



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE  
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO

SAMANTA MESQUITA DE HOLANDA

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS DE MICROFITA UTILIZANDO  
TECIDO DE MALHA A BASE DE FIBRAS TÊXTEIS COMPOSTAS**

MOSSORÓ – RN

2016

SAMANTA MESQUITA DE HOLANDA

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS DE MICROFITA UTILIZANDO  
TECIDO DE MALHA A BASE DE FIBRAS TÊXTEIS COMPOSTAS**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior – UFERSA

Co-orientador: Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade – UFERSA

MOSSORÓ – RN

2016

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)  
Setor de Informação e Referência (SIR)

M737e

Mesquita de Holanda, Samanta.

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS  
DEMICROFITAS UTILIZANDO TECIDO DE MALHA  
A BASE DE FIBRAS TÊXTEIS COMPOSTAS /  
Samanta Mesquita de Holanda. - 2016.

147 f.: il.

Orientador: Idalmir de Souza Queiroz Júnior.

Coorientador: Humberto Dionísio de Andrade.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em  
Sistemas de Comunicação e Automação, 2016.

1. Antenas de Microfita. 2. Antenas Têxteis.  
3. Tecido de Malha. I. de Souza Queiroz Júnior, Idalmir,  
orient. II. Dionísio de Andrade, Humberto, co-orient. III.  
Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

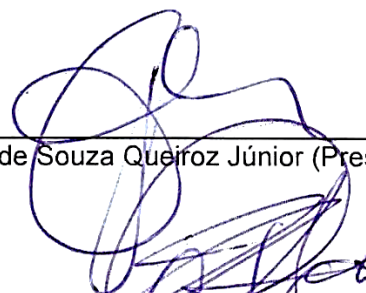
SAMANTA MESQUITA DE HOLANDA

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS DE MICROFITA UTILIZANDO  
TECIDO DE MALHA A BASE DE FIBRAS TÊXTEIS COMPOSTAS**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.


Defendida em: 01 / 12 / 2016.

**BANCA EXAMINADORA**



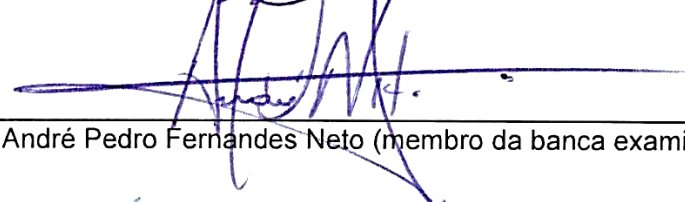
---

Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior (Presidente e Orientador - UFERSA)



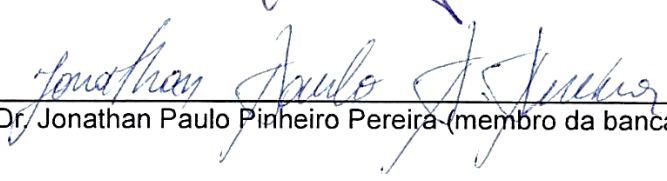
---

Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade (Co- Orientador - UFERSA)



---

Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto (membro da banca examinadora - UFERSA)



---

Prof. Dr. Jonathan Paulo Pinheiro Pereira (membro da banca examinadora - IFRN)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter permitido encarnar nesse mundo e me atribuir missões que me proporcionaram experiências e aprendizados únicos, me permitindo dar continuidade ao processo evolutivo como ser espiritual.

Aos bons espíritos que estiveram presentes nessa jornada me auxiliando no discernimento das coisas e por permitir que conhecesse pessoas de boa índole sem as quais não teria conseguido chegar tão longe.

Aos meus pais, Tiago José Paiva de Holanda e Zenaide Mesquita de Holanda, por cada incentivo e orientação, por todos os sacrifícios e abdições feitos em prol da minha educação, como também pela preocupação para que estivesse sempre andando pelo caminho correto. Vocês são para mim exemplo de força, coragem, perseverança e energia infinita para nunca desistir diante do primeiro obstáculo encontrado. Vocês são e sempre serão meu maior porto seguro e simplesmente aqueles que mais amo.

Ao meu irmão, Santiago Mesquita de Holanda, que sempre me apoiou, protegeu e aconselhou, sendo meu melhor amigo.

Aos meus amigos, Arimateia Pinto, Juan Rafael, Anamaria Sena, Isaac Barros, Diego Pires, Flávia Dantas, Alexandre Henrique, Alexandre Araújo, Ellen Guerra, Thomas Tadeu, Talles Amony, Manasés Rocha, Bruno Marcelo, Francisco Magno, Kaíck Viana, Felipe Bezerra, Maria das Graças (Gracinha), Allyson Filgueira e Daniel Carlos, que me acompanharam durante essa jornada, que me ajudaram e proporcionaram momentos de descontração e reflexão, fazendo desse período uma experiência de vida acadêmica e social mais agradável e prazerosa. É uma grande honra e felicidade poder construir laços de amizade e desfrutar da companhia e confiança de pessoas tão boas, educadas, generosas e inteligentes, como vocês. Não foram os únicos, mas foram os que mais marcaram.

Ao meu orientador, Idalmir Queiroz de Souza Júnior e ao meu co-orientador Humberto Dionísio de Andrade, pela confiança, orientação, disponibilidade, calma e incentivo durante a realização deste trabalho, contribuindo com ensinamentos e partilhando conhecimentos, dos quais jamais esquecerei.

Aos professores Marcos Silva de Aquino e Moisés Vieira de Melo que com paciência e presteza tornaram possível a realização deste trabalho, auxiliando e contribuindo com seus conhecimentos, experiência e maquinário necessário. Ao professor Ronaldo Martins pela disponibilidade e paciência para efetuar alguns testes que foram de fundamental importância

para esse trabalho. Ao professor Jonathan Paulo Pinheiro Pereira, pela disposição de material fundamental para realização do projeto e pelas contribuições ao participar da banca.

A todos os professores que tive durante o curso, por todo conhecimento e desenvolvimento de senso crítico que foram utilizados na construção desta dissertação.

A todos que de maneira direta ou indireta me influenciaram e contribuíram na minha vida acadêmica e pessoal.

*“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações”.*

(Nicola Tesla)

## RESUMO

O crescente desenvolvimento das telecomunicações, principalmente a de dispositivos móveis, têm intensificado as pesquisas relacionadas as antenas de microfita nos últimos anos, visto que estas possuem propriedades singulares, bem como vasta gama de aplicações. A constante procura por dispositivos mais leves e flexíveis impulsionou as pesquisas na área de tecnologia vestível, onde componentes eletrônicos são inteiramente embutidos em suas fibras têxteis. Nesse contexto, os tecidos malha possuem a elasticidade necessária para criar peças adaptáveis e esportivas, permitindo alta mobilidade e conforto aos seus usuários. As antenas têxteis são maleáveis e, por essa razão, têm grande utilidade em aplicações onde a rigidez das antenas tradicionais é considerada uma limitação, como em roupas de uso militar e na área biomédica. Este trabalho tem como objetivo estudar e desenvolver antenas de microfita utilizando tecido de malha à base de fibras têxteis compostas, mostrando os procedimentos e materiais utilizados desde a caracterização e escolha dos tecidos até o projeto, confecção e testes da antena têxtil. A caracterização elétrica foi realizada através de um Analisador de Redes Vetorial (ARV) para obtenção das propriedades elétricas (permissividade e tangente de perdas). A obtenção das propriedades têxteis (gramatura, estabilidade dimensional, titulação e resistência a tração) foi feita de acordo com as normas técnicas, utilizando os equipamentos disponíveis no Departamento de Engenharia Têxtil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). A antena foi dimensionada através do modelo da linha de transmissão em programa desenvolvido na linguagem Fortran de acordo com as propriedades elétricas dos substratos têxteis. Posteriormente a antena foi desenhada e simulada no *HFSS*<sup>®</sup> (*High Frequency Structural Simulator*), onde serão obtidos os diagramas de radiação, perda de retorno, densidade de corrente e ganho. O melhor resultado simulado foi implementado com o tecido de malha disposto numa estrutura de três camadas de acordo com as dimensões projetadas e, em seguida, a antena foi testada através de um analisador de espectro, onde foram coletados dados que permitiram a confecção da carta de Smith e gráfico da perda de retorno. Os dados experimentais foram comparados com os simulados e, os resultados analisados de acordo com a literatura especializada que embasam este trabalho.

*Palavras-Chave:* Antenas de Microfita, Antenas Têxteis, Tecido de Malha.



## ABSTRACT

The growing development of telecommunications, especially mobile devices, has intensified related searches the microstrip antennas in recent years since they have unique properties and wide range of applications. The constant demand for lighter and more flexible devices boosted research in wearable technology area where electronics are fully embedded in their fibers. In this context, knitted fabrics have the necessary elasticity to create adaptable and sports parts, enabling high mobility and comfort to its users. The textile antennas are malleable and, therefore, have great utility in applications where rigidity of traditional antennas is considered limiting, as in military use clothing and in the biomedical field. This work aims to study and develop microstrip antennas using knitted fabric based composite fibers, showing the procedures and materials used from the characterization and choice of fabrics to the design, manufacture and testing of the textile antenna. The electrical characterization was carried out using a Vector Network Analyzer (ARV) to obtain the electrical properties (permittivity and tangent losses). Obtaining textile properties (weight, dimensional stability, degree and tensile strength) was made in accordance with the technical standards, using the equipment available at the Department of Textile Engineering at the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN). The antenna has been designed using the transmission line model of Fortran program developed in accordance with the electrical properties of textile substrates. Subsequently the antenna was designed and simulated in HFSS<sup>®</sup> (*High Frequency Structural Simulator*), where radiation patterns are obtained, return loss, the Smith chart, current density and gain. The best simulated result was implemented with tissue disposed knitted in a three-layer structure according to the dimensions designed, and then the antenna is tested using a spectrum analyzer, which were collected data that allowed the manufacture of the letter Smith and graph of return loss. The experimental data were compared with the simulated and the results analyzed according to the literature that support this paper.

*Keywords:* Microstrip antennas, Antennas Textiles, Knitted Fabric.

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1 – Denominação das faixas de frequência em micro-ondas do IEEE. ....                                 | 23  |
| Tabela 2 - Classificação das fibras têxteis.....   | 62  |
| Tabela 3 – Materiais dielétricos utilizados em antenas têxteis.....  | 79  |
| Tabela 4 - Principais materiais condutores utilizados em antenas têxteis. ....                               | 85  |
| Tabela 5 - Comparação de materiais têxteis utilizados no projeto de antenas vestíveis. ....                  | 91  |
| Tabela 6 - Tecidos de malha utilizados .....   | 93  |
| Tabela 7 - Características elétricas dos tecidos analisados na frequência de 2,45GHz.....                    | 108 |
| Tabela 8 - Título, gramatura e espessura dos tecidos.....  | 109 |
| Tabela 9 - Valores máximos de resistência a tração.....  | 112 |
| Tabela 10 - Dimensões das antenas projetadas com diferentes substratos têxteis. ....                         | 114 |
| Tabela 11 – Principais características elétricas das antenas têxteis simuladas.....                          | 119 |
| Tabela 12 - Dimensões para antenas com substrato de PP+PLA e diferentes larguras de <i>inset feed</i> . .... | 119 |
| Tabela 13 - Características elétricas das antenas simuladas com substrato de PP+PLA. ....                    | 123 |
| Tabela 14 - Propriedades elétricas simuladas e medidas das antenas com substrato de PP+PLA .....             | 128 |
| Tabela 15 - Resumo das características elétricas e têxteis dos tecidos analisados.....                       | 140 |
| Tabela 16 - Resumo das dimensões físicas para as antenas têxteis projetadas .....                            | 141 |
| Tabela 17 - Resumo das características elétricas para as antenas têxteis simuladas.....                      | 142 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Espectro de frequência ISM Brasil. ....  | 24 |
| Figura 2 - Diagrama de radiação 3D e 2D de uma antena dipolo. ....  | 26 |
| Figura 3 - Diagrama de radiação tridimensional de uma antena direcional. ....   | 27 |
| Figura 4 - Arranjo geométrico para definir um radiano e um esferorradiano. ....   | 28 |
| Figura 5 - Circuito equivalente para antena transmissora e receptora. ....  | 29 |
| Figura 6 - Terminais de Referência de uma Antena. ....  | 30 |
| Figura 7 - Gráfico da perda de retorno em função da frequência mostrando as frequências e a largura de banda de uma antena. ....                    | 32 |
| Figura 8 - Modelo de quadripolo. ....   | 34 |
| Figura 9 - Círculo unitário no qual a carta de Smith é construída. ....   | 36 |
| Figura 10 - Conjunto de Círculos (a) Resistivos e (b) de Reatância. ....  | 38 |
| Figura 11 - Exemplo de variação típica da (a) constante dielétrica e do (b) fator de perdas de um material com a frequência do campo aplicado. .... | 41 |
| Figura 13 - Configuração básica de uma antena de microfita. ....  | 42 |
| Figura 14 - Formas geométricas assumidas pelo patch. ....   | 43 |
| Figura 15 - Diagramas de radiação: (a) Arranjo Broadside; (b) Arranjo End-Fire. ....  | 44 |
| Figura 16 - Efeitos da espessura do substrato e da constante dielétrica na largura de banda e eficiência da antena. ....                            | 46 |
| Figura 17 - Alimentação por linha de alta impedância. ....  | 47 |
| Figura 18 - Alimentação por cabo coaxial. ....  | 48 |
| Figura 19 - Alimentação por acoplamento por abertura. ....  | 49 |
| Figura 20 - Alimentação por acoplamento por proximidade. ....   | 50 |
| Figura 21 - Geometria de uma plaqueta retangular de microfita para o modelo da cavidade. ....   | 52 |
| Figura 22 - Distribuição de cargas e densidade de corrente na antena de microfita. ....   | 52 |
| Figura 23 - Antena de microfita retangular. ....  | 56 |
| Figura 24 - Comprimento físico e efetivo de um patch retangular. ....   | 57 |
| Figura 25 - <i>Inset Feed</i> aplicado ao patch de uma antena de microfita. ....  | 59 |
| Figura 25 - Processo produtivo da cadeia têxtil. ....   | 60 |
| Figura 26 - Estruturas têxteis de (a) Tecido Plano; (b) Tecido de Malha; (c) Não-Tecido. ....   | 61 |
| Figura 27 - Cadeia polimérica de celulose presente no tufo de fibra de algodão. ....  | 64 |
| Figura 28 - Principais usos da fibra de algodão. ....   | 64 |
| Figura 29 - Aparência e estrutura química do polipropileno. ....  | 65 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 30 - Processo de extrusão do polipropileno. ....  | 65 |
| Figura 31 - Processo de obtenção da fibra de milho.....  | 66 |
| Figura 32 - Estrutura molecular do PLA. ....   | 66 |
| Figura 33 - Sequência da fabricação da fibra de Bambu. ....  | 67 |
| Figura 34 – Estrutura molecular parcial de um tipo de lignina. ....  | 68 |
| Figura 38 - Produtos obtidos durante processo de fabricação da fibra de soja. ....   | 69 |
| Figura 36 - Estrutura básica do tecido plano. ....   | 70 |
| Figura 37 - Tipos de tecido plano. (a) Tafetá; (b) Sarja; (c) Cetim. ....  | 70 |
| Figura 38 - Estrutura básica do tecido de malha. ....  | 71 |
| Figura 39- Tecido de Malha por: (a) Trama; (b) Urdume (Teia). ....   | 72 |
| Figura 40 - Tipos de laçadas: (a) Meia Malha (Jersey); (b) Fang; (c) Flutuante.....  | 72 |
| Figura 41 - Estrutura Multicamadas. ....   | 74 |
| Figura 42 - Estrutura Sanduíche. ....  | 74 |
| Figura 43 - Tecido com memória de forma.....   | 75 |
| Figura 44 - Orientações das camadas dos tecidos: (a) Biaxial; (b) Triaxial; (c) Quadriaxial ..   | 75 |
| Figura 48 - Relação entre a permissividade relativa e a umidade relativa. ....   | 80 |
| Figura 46 - Método da linha de transmissão/reflexão com sonda coaxial.....   | 82 |
| Figura 47 - Método da linha de transmissão/reflexão com guia de ondas. ....  | 82 |
| Figura 48 - Método do Espaço Livre.....  | 83 |
| Figura 49 - Método da cavidade ressonante. ....  | 83 |
| Figura 50 - Método das placas paralelas. ....  | 84 |
| Figura 51 - Variação da resistividade elétrica superficial de uma malha devido ao alongamento.<br>.....  | 85 |
| Figura 52 – Linhas de microfita com diferentes larguras feitas a partir de serigrafia: (a) 1<br>impressão; (b) 10 impressões. ....                                     | 87 |
| Figura 53 - Linhas de microfita utilizadas. (a) Representação gráfica do dispositivo com linhas<br>de teste. (b) Linhas de microfita com base em tecido Flectron. .... | 87 |
| Figura 54 - Antena têxtil com patch PCPTF e substrato Jeans: vista frontal (a) e posterior (b).<br>.....   | 88 |
| Figura 55 - Vista superior (a) e inferior (b) para antena têxtil com patch bordado com fio de<br>prata em substrato de EPDM. ....                                      | 89 |
| Figura 56 –Duas amostras de antenas: (a) Patch de folha de cobre; (b) Patch de fio cobre.....  | 89 |
| Figura 57 - Antena têxtil para aplicação em trajes espaciais: (a) alimenta por cabo coaxial (b)<br>alimentada por linha de alta impedância. ....                       | 90 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 58 - Comparação entre as técnicas de fabricação de antenas têxteis utilizando fio condutor bordado.....                                 | 91  |
| Figura 59 - Fluxograma do processo metodológico utilizado. ....  | 93  |
| Figura 60 - Imagens das estruturas dos tecidos analisados com aproximação de 3x. ....  | 94  |
| Figura 61 – ARV Rohde & Schwarz ZNB4 e kit Aligent 85070 .....   | 95  |
| Figura 62 - Método da sonda coaxial utilizado. ....  | 96  |
| Figura 63 - Balança analítica Bel Mark M214ai. ....  | 97  |
| Figura 64 - Equipamentos utilizados no ensaio de gramatura. (a) Cortador circular MESDAN 175B; (b) Balança analítica da Shimadzu AUY-220.....  | 98  |
| Figura 65 - Equipamentos utilizados no ensaio de estabilidade dimensional: (a) washtester MATHIS; (b) Estufa Nova Ética.....                   | 98  |
| Figura 66 - Ensaio de estabilidade dimensional. ....   | 99  |
| Figura 67 - Ensaio de resistência a tração (a) Antes da ruptura; (b) Após da ruptura.....  | 99  |
| Figura 68 - Paquímetro digital.....  | 100 |
| Figura 69 - Antena têxtil com patch retangular projetada: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral   | 100 |
| Figura 70 - Estrutura da antena têxtil projetada. ....   | 101 |
| Figura 71 - Antenas com <i>inset feed</i> de dimensão $y_w$ igual a: (a) 4 mm e (b) 1 mm.....  | 102 |
| Figura 72 - Antena têxtil construída visão: (a) Frontal e (b) Posterior.....   | 103 |
| Figura 73 - Conector SMA-KE fêmea reverso.....   | 104 |
| Figura 74 - Analisador de Espectro. ....   | 104 |
| Figura 75 – Vistas frontal (a esquerda) e posterior (a direita) das antenas têxteis com <i>inset feed</i> de largura: (a) 1 mm; (b) 4 mm. .... | 105 |
| Figura 76 - Constante dielétrica dos tecidos malha. ....   | 106 |
| Figura 77 - Tangente de Perdas dos tecidos analisados.....   | 107 |
| Figura 78 - Estabilidade dimensional. ....   | 110 |
| Figura 79 - Resistência a tração no sentido da coluna.....   | 111 |
| Figura 80 - Resistência a tração no sentido do curso. ....   | 112 |
| Figura 81 – Coeficientes de reflexão simulados para as antenas com diferentes substratos têxteis.....  | 114 |
| Figura 82 – Diagramas de radiação 2D e 3D das antenas têxteis simuladas a uma frequência de 2,45GHz.....                                       | 115 |
| Figura 83 - Densidades de corrente das antenas têxteis simuladas a frequência de 2,45 GHz. ....  | 118 |
| Figura 84 – Coeficientes de reflexão simulados para antenas com substrato de PP+PLA. ...   | 120 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 85 - Diagramas de radiação 2D e 3D para as antenas com substrato de PP+PLA a frequência de 2,45 GHz. ....   | 121 |
| Figura 86 - Densidade de corrente para antenas com substrato de PP+PLA a frequência de 2,45 GHz.....   | 122 |
| Figura 87 – Coeficientes de reflexão medidos para antenas com substrato de PP+PLA. ....  | 124 |
| Figura 88 - Carta de Smith medida para antenas com substrato de PP+PLA. ....   | 125 |
| Figura 92 - Comparação entre os coeficientes de reflexão medidos e simulados para as antenas com substrato PP+PLA: (a) Padrão, (b) Inset_feed_1mm e (c) Inset_feed_4mm. .... | 127 |

## NOMECLATURA

### *Letras Latinas*

BW – Largura de banda da antena

C – Comprimento do fio

D – Diretividade

$\vec{E}$  – Campo elétrico;

-e – Carga do elétron

$f_{inf}$  – Frequência inferior

$f_r$  – Frequência de ressonância ou central

$f_{sup}$  – Frequência superior

G – Ganho da antena

$\vec{H}$  – Intensidade de campo magnético;

h – Espessura do substrato

$\vec{J}$  – Densidade de corrente;

$J_0$  – Função de Bessel de primeira ordem

$J_b$  – Densidade de corrente no inferior;

$J_t$  – Densidade de corrente no superior;

$k_0$  – Número de onda no espaço livre

$k_x$ ,  $k_y$  e  $k_z$  – Número de onda nas direções x, y e z, respectivamente.

L – Comprimento do *patch*

$L_0$  – Comprimento da linha de microfita

m – Massa do elétron

M – Massa do fio

n – Número de elétrons

$P_e$  – Polarização elétrica

$P_{in}$  – Potência total fornecida

$P_{loss}$  – Potência dissipada (perdas ôhmicas)

$P_{med}$  – Densidade de potência

$P_{rad}$  – Potência total radiada

r – Raio

$R_A$  – Resistência da antena

RL – Perda de retorno;  
S<sub>11</sub> – Coeficiente de reflexão da tensão no acesso 1 do quadripolo;  
S<sub>12</sub> – Isolação do quadripolo;  
S<sub>21</sub> – Ganho de tensão direta do quadripolo;  
S<sub>22</sub> – Coeficiente de reflexão da tensão no acesso 2 do quadripolo;  
T – Título do fio  
u – Velocidade de deriva  
U(θ,φ) – Intensidade de radiação numa dada direção  
U<sub>máx</sub> – Intensidade de radiação máxima  
U<sub>med</sub> – Intensidade de radiação média  
W – Largura do *patch*  
W<sub>0</sub> – Largura da linha de microfita  
X<sub>e</sub> – Suscetibilidade elétrica do material  
y<sub>0</sub> – Comprimento do *inset feed*  
y<sub>w</sub> – Largura do *inset feed*  
Z – Impedância de carga  
Z<sub>0</sub> – Impedância característica da linha de transmissão  
Z<sub>A</sub> – Impedância da antena  
Z<sub>in</sub> – Impedância de entrada da antena

### ***Letras Gregas***

tanδ – Tangente de perdas  
Γ – Coeficiente de reflexão  
ε – Permissividade elétrica complexa  
ε' – Constante dielétrica  
ε'' – Fator de Perdas  
ε<sub>0</sub> – Permissividade elétrica do vácuo  
ε<sub>r</sub> – Permissividade elétrica relativa do material  
ε<sub>ref</sub> – Constante dielétrica efetiva  
η<sub>rad</sub> – Eficiência de radiação  
η<sub>ref</sub> – Eficiência de reflexão  
η<sub>total</sub> – Eficiência total  
θ – Ângulo plano horizontal (azimutal)



$\lambda$  – Comprimento de onda  
 $\mu$  – permeabilidade magnética  
 $\rho_v$  – Densidade de fluxo de cargas  
 $\sigma$  – Condutividade do material  
 $\tau$  – Intervalo médio de tempo entre as colisões  
 $\varphi$  – Ângulo plano vertical (elevação)  
 $\omega$  – Frequência angular

### ***Siglas***

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ARV – Analisador de Rede Vetorial  
BAM – Fibra de Bambu  
CO – Algodão  
*FDTD* – *Finite Difference Time Domain* (Diferenças Finitas no Domínio do Tempo).  
*FEM* – *Finite Element Method* (Métodos dos Elementos Finitos)  
*GPS* – *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)  
*ISM* – *Industrial Scientific and Medical* (Industrial Científica e Médica)  
*MMICs* – *Monolithic Microwave Integrated Circuit* (Circuitos Integrados Monolíticos de Micro-ondas)  
*MNM* – *Multiport Network Model* (Modelo de Rede Multiporta)  
*MoM* – *Method of Moments* (Método dos Momentos)  
*MTF* – *Multi Frame Joiner*  
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora  
*OSI* – *Open Systems Interconnection* (Sistema de Interconexão Aberto)  
*PBG* – *Photonic Band Gap*  
PIB – Produto Interno Bruto  
*PLA* – *Polylactic Acid* (Fibra de Ácido Polilático)  
PP – Fibra de Polipropileno  
*RFID* – *Radio-Frequency IDentification* (Identificação por Rádio Frequência)  
*SPF* – *Soybean Protein Fibres* (Fibra de Soja)  
TEM – Transversal Eletromagnético  
*TLM* – *Transmission Line Method* (Modelo de Linha de Transmissão)  
TM – Transversal Magnético

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

*UWB – Ultra Wide Band* (Ultra Banda Larga)

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                                   | <b>21</b> |
| 1.1 OBJETIVO GERAL.....                                    | 22        |
| 1.2 OBEJETIVOS ESPECÍFICOS.....                            | 22        |
| <b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>                       | <b>23</b> |
| 2.1 ANTENAS DE MICROFITA .....                             | 23        |
| <b>2.1.1 Parâmetros e Propriedades .....</b>               | <b>25</b> |
| 2.1.1.1 Diagrama de Radiação .....                         | 25        |
| 2.1.1.2 Intensidade de Radiação .....                      | 27        |
| 2.1.1.3 Impedância de Entrada .....                        | 28        |
| 2.1.1.4 Diretividade, Ganho e Eficiência.....              | 29        |
| 2.1.1.5 Frequência de Ressonância e Largura de Banda ..... | 31        |
| 2.1.1.6 Perda de Retorno.....                              | 33        |
| 2.1.1.7 Carta de Smith .....                               | 35        |
| 2.1.1.8 Densidade de Corrente e Tangente de Perdas.....    | 38        |
| <b>2.1.2 Estrutura.....</b>                                | <b>42</b> |
| 2.1.2.1 Patch .....  | 42        |
| 2.1.2.2 Plano de Terra.....                                | 44        |
| 2.1.2.3 Substrato .....                                    | 45        |
| <b>2.1.3 Métodos de Alimentação.....</b>                   | <b>47</b> |
| 2.1.3.1 Linha de Alta Impedância.....                      | 47        |
| 2.1.3.2 Cabo Coaxial .....                                 | 48        |
| 2.1.3.3 Acoplamento por Abertura .....                     | 48        |
| 2.1.3.4 Acoplamento por Proximidade .....                  | 49        |
| <b>2.1.4 Métodos de Análise e Projeto .....</b>            | <b>50</b> |
| 2.1.4.1 Modelo da Cavidade .....                           | 51        |
| 2.1.4.2 Modelo da Linha de Transmissão.....                | 55        |
| 2.1.4.3 Inset Feed.....                                    | 58        |
| 2.2 TECIDOS .....  | 60        |
| <b>2.2.1 Fibras Têxteis .....</b>                          | <b>61</b> |
| 2.2.1.1 Algodão.....                                       | 63        |
| 2.2.1.2 Polipropileno.....                                 | 65        |
| 2.2.1.3 Milho.....   | 66        |

|  |            |
|--|------------|
| 2.2.1.4 Bambu.....   | 67         |
| 2.2.1.5 Soja.....  | 68         |
| <b>2.2.2 Estruturas Têxteis.....</b>   | <b>69</b>  |
| 2.2.2.1 Tecido Plano.....  | 70         |
| 2.2.2.2 Tecido de Malha.....   | 71         |
| 2.2.2.3 Estruturas 3D.....   | 73         |
| <b>2.2.3 Propriedades.....</b>   | <b>75</b>  |
| 2.2.3.1 Título.....  | 76         |
| 2.2.3.2 Gramatura.....   | 76         |
| 2.2.3.3 Estabilidade Dimensional.....  | 77         |
| 2.2.3.4 Resistência à Tração.....  | 77         |
| 2.3 ANTENAS TÊXTEIS.....   | 77         |
| <b>2.3.1 Materiais Aplicados em Antenas Têxteis.....</b>                               | <b>78</b>  |
| 2.3.1.1 Materiais Têxteis Dielétricos.....   | 78         |
| 2.3.1.2 Métodos de Caracterização dos Substratos Têxteis.....                          | 81         |
| 2.3.1.3 Materiais Têxteis Condutores.....  | 84         |
| <b>2.3.2 Artigos relacionados a Antenas Têxteis.....</b>                               | <b>86</b>  |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>  | <b>93</b>  |
| 3.1 CARACTERIZAÇÃO.....  | 95         |
| <b>3.1.1 Medições Elétricas.....</b>   | <b>95</b>  |
| <b>3.1.2 Medições Têxteis.....</b>   | <b>96</b>  |
| 3.2 PROJETO E SIMULAÇÃO.....   | 100        |
| 3.3 IMPLEMENTAÇÃO E TESTES.....  | 102        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>   | <b>106</b> |
| 4.1 ANÁLISES ELÉTRICAS.....  | 106        |
| 4.2 ANÁLISES TÊXTEIS.....  | 108        |
| 4.3 ANÁLISES DO PROJETO E SIMULAÇÕES.....  | 113        |
| 4.4 ANÁLISE DAS ANTENAS TÊXTEIS.....   | 123        |
| <b>5 CONCLUSÕES.....</b>   | <b>130</b> |
| <b>6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>                                     | <b>132</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>133</b> |
| <b>APÊNDICE A: Resumo das características elétricas e têxteis.....</b>                 | <b>140</b> |
| <b>APÊNDICE B: Resumo das dimensões das antenas têxteis projetadas.....</b>            | <b>141</b> |
| <b>APÊNDICE C: Resumo das características elétricas para as antenas simuladas.....</b> | <b>142</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O progresso nos sistemas de informação, fez com que o setor de telecomunicações tivesse um incremento na sua receita anual em torno de 15,8% no período de 2011 a 2015 (TELEBRASIL, 2016). Segundo a Associação Brasileira de Telecomunicação (2016), no primeiro semestre de 2016, a receita bruta do supracitado setor brasileiro foi de 113,5 bilhões de reais, equivalente a 3,8% do Produto Interno Bruto (PIB) do país. Em decorrência desse aumento na produção de dispositivos móveis é necessário que se desenvolva aparelhos que não causem interferência e sejam mais imunes a ruídos.

Nesse contexto, as pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de antenas têm se intensificado nos últimos anos, em especial, as relacionadas às antenas de microfita, visto que estas possuem propriedades singulares e uma vasta gama de aplicações. Derivas a partir das estruturas planares de microfita, essas antenas foram desenvolvidas inicialmente na década de 1950 por George A. Deschamps (DESCHAMPS, 1953) com intuito de constituir Circuitos Integrados Monolíticos de Micro-ondas (MMICs - *Monolithic Microwave Integrated Circuit*). No entanto, seu potencial só foi explorado a partir de 1970 por pesquisadores como Robert E. Munson (MUNSON, 1974). Segundo Brinhole (2005), a partir de 1980 foi estabelecida a modelagem dos elementos físicos de uma antena de microfita, e as pesquisas se intensificaram com aplicações práticas. Desde então diversas técnicas, métodos de análises, algoritmos e materiais (HESTAND e CHRISTODOULOU, 1996; SUBRAMANIAM, et al., 2014; SOUZA, 2015) foram desenvolvidos com o objetivo de estudar, compreender e produzir estas antenas. Características como baixo custo, pequenas dimensões, e adaptabilidade a superfícies planas ou curvas, fizeram desta antena uma das mais interessantes para a área científica, médica e industrial.

A incessante procura por dispositivos cada vez mais leves e flexíveis têm impulsionado as pesquisas na área de tecnologia vestível (TSOLIS, et al. 2014), onde componentes eletrônicos são inteiramente embutidos em suas fibras têxteis. As antenas de microfita que operam na frequência de 2,45 GHz na banda Industrial Científica e Médica (ISM – *Industrial Scientific and Medical*) são mais apropriadas para integração nas roupas devido ao seu baixo perfil e estrutura planar (HERTLEER, et al., 2010). A antena têxtil é um importante componente na comunicação wireless em tecidos inteligentes, tendo atraído grande atenção para aplicações industriais (VIRKKI, et al., 2015), militares (LIM, et al., 2014) e médica (HERTLEER, et al., 2008). Essas antenas são maleáveis e, por essa razão, têm grande utilidade em aplicações onde a rigidez das antenas tradicionais é considerada uma limitação, como em roupas de uso militar,

para localização de pessoas através de Sistema de Posicionamento Global (*GPS – Global Positioning System*) e, na área biomédica, em circuitos de sensoriamento e monitoramento de frequência cardíaca (LIN; ITO, 2014).

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo estudar e desenvolver antenas de microfita utilizando tecido de malha a base de fibras têxteis compostas como substrato, mostrando os procedimentos e materiais utilizados desde a caracterização e escolha dos tecidos até o projeto, confecção e testes da antena têxtil.

### 1.2 OBEJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar e escolher os tecidos de malha;
- Projetar e simular as antenas com base nos dados obtidos na etapa anterior;
- Confeccionar e testar as antenas;
- Comparar e analisar os resultados experimentais e os simulados.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste tópico serão apresentados os principais conceitos utilizados no desenvolvimento e análise deste trabalho. Na seção 2.1 serão abordadas definições relativas ao estudo das antenas de microfita, suas propriedades, estrutura, métodos de alimentação e projeto. Na seção 2.2 os tecidos são o foco principal, explanando-se sobre os tipos de fibras e estruturas que compõe essa categoria. Na seção 2.3 as antenas têxteis serão apresentadas, assim como os principais materiais (condutores e dielétricos) que têm sido utilizados em sua confecção além de projetos e estudos realizados na área.

### 2.1 ANTENAS DE MICROFITA

As antenas podem ser definidas como um dispositivo de transição entre a propagação de ondas eletromagnéticas guiadas em linhas de transmissão ou circuitos para propagação em um meio livre (BALANIS, 2009), que tem como principal função transmitir ou receber dados à determinadas faixas de frequência.

A antena de microfita é um dispositivo planar que atua na faixa de frequência de micro-ondas (300 MHz – 300 GHz). Segundo Wentworth (2006), a faixa de frequência compreendida entre 1 GHz e 40 GHz detém a maior concentração de aplicações da engenharia de micro-ondas. As principais aplicações de acordo com o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) para as faixas de frequência em microondas e suas respectivas bandas são mostradas na Tabela 1.

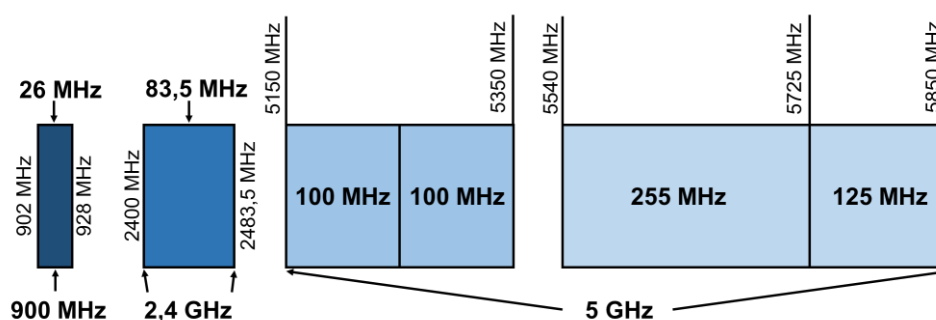
Tabela 1 – Denominação das faixas de frequência em micro-ondas do IEEE.

| Banda | Faixa de Frequência | Aplicações  |
|-------|---------------------|---|
| L     | 1 – 2 GHz           | Comunicação pessoal e <i>GPS</i>  |
| S     | 2 – 4 GHz           | Comunicação pessoal ( <i>Wi-fi</i> , <i>Bluetooth</i> , etc.) e forno de microondas |
| C     | 4 – 8 GHz           | Comunicação via satélite  |
| X     | 8 – 12 GHz          | Radar terrestre para navegação aérea  |
| Ku    | 12 – 18 GHz         | Radar e rádio ponto a ponto   |
| K     | 18 – 26,5 GHz       | Radar e rádio ponto a ponto   |
| Ka    | 26,5 – 40 GHz       | Radar e rádio ponto a ponto   |

Fonte: Adaptado de WENTWORTH, 2006.

Dentro das bandas L, S e C existem as faixas de frequência ISM, que abrangem a faixa de 900 MHz a 5 GHz, como ilustra a Figura 1, e são reservadas internacionalmente para o desenvolvimento industrial, científico e médico. Essas faixas englobam diversas tecnologias de comunicação empregadas em diversos dispositivos, como *Bluetooth* e *Wi-Fi*. As bandas ISM podem ser usadas sem licença e estão sujeitas a um conjunto de regras de operação relativamente reduzidas (SOARES, 2004).

Figura 1 - Espectro de frequência ISM Brasil.



Fonte: Adaptado de SOARES, 2004.

De acordo com Soares (2004), o IEEE desenvolveu um padrão conhecido como 802.11b, que é baseado no modelo de Sistema de Interconexão Aberto (OSI – *Open Systems Interconnection*) e opera na faixa de 2,4 GHz, inserindo no lugar do *Frequency Hopping* o *Direct Sequence* para aumentar a eficiência espectral elevando as taxas de dados até 11 Mbit/s, mas com valores médios reais de 4 Mbit/s até 6 Mbit/s na transmissão das informações dos usuários em ambientes *indoor* e taxas menores que 4 Mbit/s para ambientes *outdoor*.

As antenas de microfita, na sua configuração mais simples consiste em um *patch* radiante em um dos lados do substrato dielétrico, enquanto no outro lado existe um plano de terra (ver seção 2.1.2). Entre as diversas aplicações que esta antena possui, pode-se destacar: dispositivos *wireless*, Identificação por Rádio Frequência (RFID – *Radio-Frequency Identification*), *BlueTooth* e *Wi-Fi*.

Diversas estruturas e tipos de antenas podem ser usadas de acordo com a aplicação determinada. No entanto, com o crescente desenvolvimento das telecomunicações, as antenas planares de microfita com estrutura reduzida são promissoras, tendo em vista que, propiciam um ótimo desempenho e uma composição leve. Atualmente a utilização dessas antenas está



conectada à tecnologia de Ultra Banda Larga (*UWB – Ultra Wide Band*), pois proporciona altas larguras de banda e elevadas taxas com menor interferência de multipercuro.

Entre as várias características das antenas de microfita, podem-se destacar seu baixo custo e leveza, tamanho reduzido, largura de banda estreita, adaptabilidade a superfícies planas ou curvas, compatibilidade com circuitos integrados, existência de ondas de superfície, baixa eficiência de radiação, transmissão em ondas longas e médias, polarização circular e linear com simples alimentação, entre outras (CAETANO, 2014).

As modernas antenas de microfita são adequadas para aplicações nos sistemas de telecomunicações, a exemplo das comunicações móveis; nas comunicações via satélite, em *GPS*; na atividade aeroespacial, em radares, mísseis e foguetes e, na biomedicina, no diagnóstico de tumores (FILHO, 2010).

### **2.1.1 Parâmetros e Propriedades**

Nesta seção serão descritas as principais propriedades das antenas de microfita, como também, os parâmetros e equações essenciais para o efetivo estudo de seu desempenho e aplicabilidade.

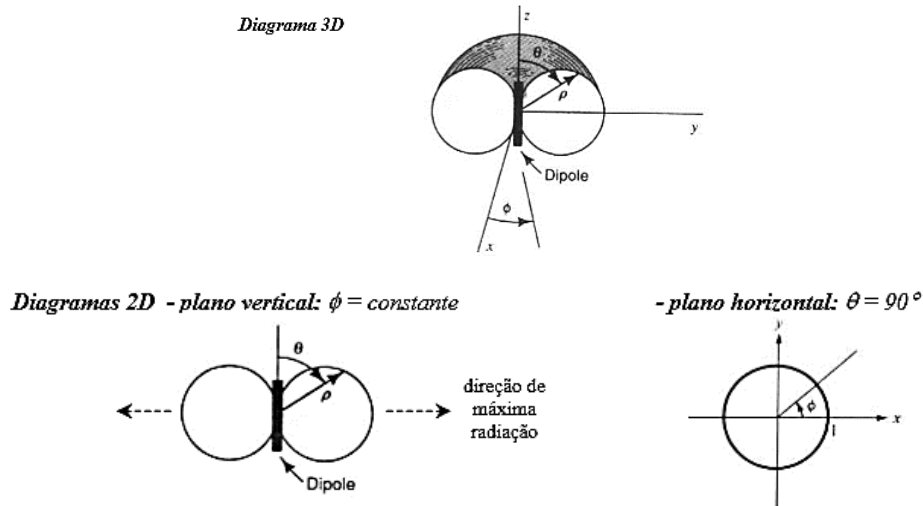
#### **2.1.1.1 Diagrama de Radiação**

O diagrama de radiação ou padrão de radiação é a representação gráfica que apresenta as características de propagação das ondas eletromagnéticas de uma antena em função de coordenadas espaciais (BALANIS, 2009), sendo obtido através da amplitude da força de campos distantes em relação a posição em torno da antena, a uma distância fixa a partir desta (POZAR, 2012). O diagrama de radiação exhibe a amplitude do campo magnético, do campo elétrico ou da potência radiada (comumente normalizados em relação ao seu valor máximo) em função dos ângulos  $\varphi$  e  $\theta$  na região de campo distante.

Segundo o Balanis (2009), no caso geral, o diagrama é uma figura tridimensional, mas na maioria das vezes é representado como figuras bidimensionais (planos de corte), podendo ainda, ser representado através de coordenadas retangulares. Os planos de corte principais são o plano vertical ou de elevação (geralmente  $\varphi = 0^\circ$  ou  $\varphi = 90^\circ$ ) e o horizontal ou azimutal ( $\theta = 90^\circ$ ). Para antenas com polarização linear estes planos geralmente correspondem a planos que

contêm o vetor campo elétrico (plano E) e o vetor campo magnético (plano H). A Figura 2 demonstra os diagramas de radiação tridimensional e bidimensional de uma antena tipo dipolo.

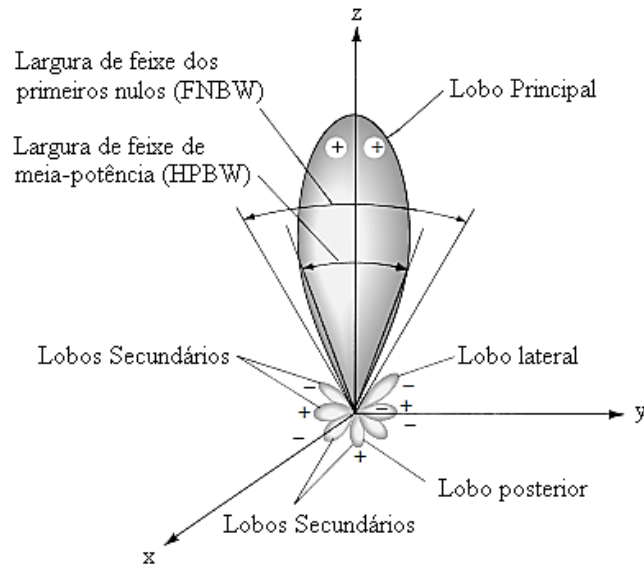
Figura 2 - Diagrama de radiação 3D e 2D de uma antena dipolo.



Fonte: LEGG, 2016.

Através da análise do diagrama de radiação é possível se obter parâmetros importantes para caracterizar a antena como, por exemplo, o lobo principal, que mostra a direção da máxima radiação da antena e, os lobos menores, que, geralmente, mostram a radiação existente em direções indesejadas e devem ser minimizados para que haja um aumento na eficiência da antena (BALANIS, 2009). A Figura 3 mostra um exemplo de diagrama radiação tridimensional de uma antena diretiva.

Figura 3 - Diagrama de radiação tridimensional de uma antena direcional.



**Fonte:** Adaptado de BALANIS, 2005.

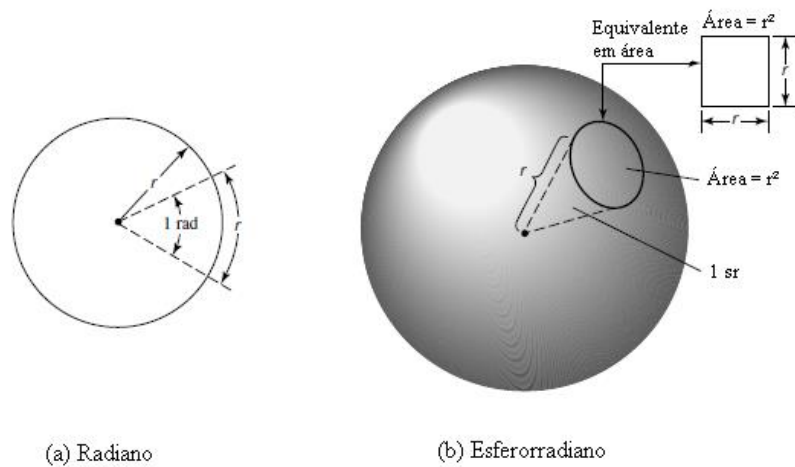
#### 2.1.1.2 Intensidade de Radiação

A intensidade de radiação ( $U(\theta, \varphi)$ ), em uma dada direção pode ser descrita como sendo a potência radiada por unidade de esferoradiano (W/sr). Pode ser obtida multiplicando a densidade de potência  $P_{med}$  pelo quadrado do raio ( $r$ ) correspondente (BALANIS, 2009), assim:

$$U(\theta, \varphi) = r^2 P_{med} \quad (1)$$

O esferoradiano é um ângulo sólido, com vértice no centro de uma esfera, que subtende na superfície desta esfera uma área numericamente igual ao quadrado do raio, como mostra a Figura 4. Como a superfície de uma esfera é  $4\pi r^2$ , a esfera toda corresponde a um ângulo sólido de  $4\pi$  esferorradianos.

Figura 4 - Arranjo geométrico para definir um radiano e um esferorradiano.



**Fonte:** Adaptado de BALANIS, 2005.

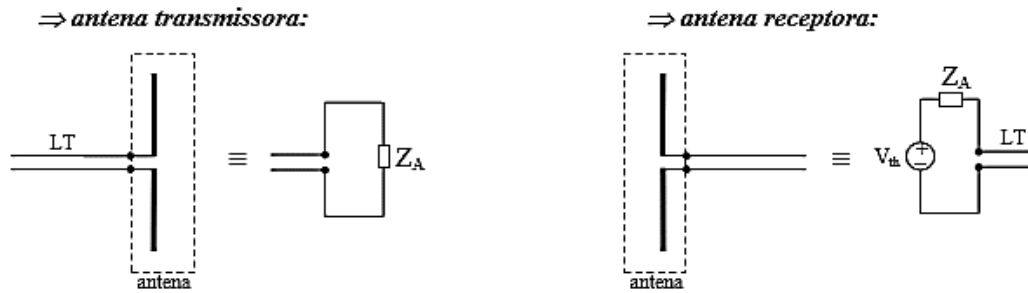
Já o valor médio da intensidade de radiação ( $U_{med}$ ) é a potência total radiada ( $P_{rad}$ ) dividida pelo ângulo sólido total ( $4\pi$  sr):

$$U_{med} = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (2)$$

### 2.1.1.3 Impedância de Entrada

Existem dois tipos principais de impedância em um sistema de transmissão de ondas eletromagnéticas, a impedância de entrada e a impedância da antena. Segundo Balanis (2009), a impedância de entrada está relacionada à linha de transmissão a qual a antena é conectada (impedância existente nos terminais da antena). Seu conhecimento é de fundamental importância pois a eficiência da transferência de energia do transmissor para antena (ou da antena para o receptor) depende diretamente da impedância da antena. A Figura 5 ilustra o circuito elétrico equivalente de uma antena transmissora e receptora.

Figura 5 - Circuito equivalente para antena transmissora e receptora.



Fonte: LEGG, 2016.

A impedância da antena ( $Z_A$ ), que pode ser descrita como (BALANIS, 2009):

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (3)$$

onde a parte resistiva  $R_A$  está associada à potência média cedida à antena durante a transmissão, denominada potência de alimentação ( $P_{in}$ ). No caso mais geral, uma parte desta potência corresponde à potência radiada ( $P_{rad}$ ) enquanto que a parcela restante corresponde à potência dissipada sob forma de calor devido às perdas ôhmicas na antena ( $P_{loss}$ ). Assim, a parte impedância resistiva da antena pode ser explicitada pela seguinte equação (BALANNIS, 2009):

$$R_A = R_{rad} + R_{loss} \quad (4)$$

É relevante citar que, a existência de objetos próximos à antena, modificam a impedância de entrada, de modo a incluir não só a impedância própria da antena, como também as contribuições ocasionadas pelas impedâncias mútuas. Isso ocorre devido ao acoplamento eletromagnético entre as antenas próximas, ocasionado pelo fluxo de corrente existente nestas últimas.

#### 2.1.1.4 Diretividade, Ganho e Eficiência

Segundo Pozar (2012), a diretividade ( $D$ ) é a capacidade da antena de focalizar energia em uma determinada direção em detrimento as outras direções. Assim, uma antena com um lóbulo principal largo pode transmitir (ou receber) energia sobre uma ampla região angular, enquanto uma antena com um lóbulo principal estreito irá transmitir (ou receber) energia sobre

uma pequena região angular (POZAR, 2012). A diretividade corresponde ao ganho diretivo máximo, ou seja, a razão entre a intensidade de radiação máxima ( $U_{max}$ ) e a intensidade de radiação média ( $U_{med}$ ), sendo expresso pela seguinte equação (BALANIS, 2009):

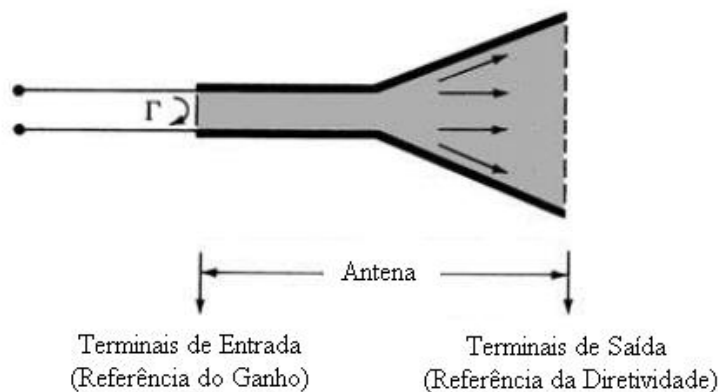
$$D = \frac{U_{max}}{U_{med}} \quad (5)$$

É importante ressaltar que quando se trata de diretividade, as perdas ôhmicas não são consideradas nos cálculos. No entanto, na prática, todas as antenas possuem perdas resistivas devido a materiais metálicos e dielétricos não perfeitos. Essas perdas causam uma diferença entre a energia inserida na entrada de uma antena e a energia radiada por essa. Dessa forma, pode-se definir a eficiência de radiação ( $\eta_{rad}$ ) de uma antena como (POZAR, 2012):

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \quad (6)$$

onde  $P_{rad}$  é a potência total radiada,  $P_{in}$  é a potência total fornecida à antena e  $P_{loss}$  é a potência perdida por efeito joule (perdas ôhmicas). Outro fator que contribui para as perdas numa antena é a reflexão causada por descasamento de impedância entre a linha de transmissão e a antena, como ilustra a Figura 6.

Figura 6 - Terminais de Referência de uma Antena.



**Fonte:** Adaptado de BALANIS, 2005.

A eficiência de reflexão pode ser obtida através da equação (BALANIS, 2009):

$$\eta_{\text{ref}} = 1 - |\Gamma|^2 \quad (7)$$

onde o coeficiente de reflexão da tensão na entrada dos terminais da antena  $\Gamma$  é obtido a partir da equação (BALANIS, 2009):

$$\Gamma = \frac{Z_{\text{in}} - Z_0}{Z_{\text{in}} + Z_0} \quad (8)$$

onde  $Z_{\text{in}}$  é a impedância de entrada da antena e  $Z_0$  é a impedância característica da linha de transmissão. A eficiência total de uma antena é calculada considerando as perdas nos terminais de entrada e no interior da estrutura, sendo expressa por:

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{rad}} \eta_{\text{ref}} \quad (9)$$

O ganho de potência da antena, ou simplesmente ganho ( $G$ ), é a potência efetivamente irradiada em comparação com uma antena de referência. Normalmente a antena de referência é uma antena isotópica (antena que possui padrão de radiação perfeito em todas as direções), neste caso a unidade é dBi (ganho em dB sobre uma antena isotópica). Para considerar as perdas na antena, utiliza-se o ganho que, pode ser definido como o produto da diretividade ( $D$ ) pelo rendimento ou eficiência total ( $\eta_{\text{total}}$ ), sendo explicitado pela seguinte equação (SILVA, 2014):

$$G = D \eta_{\text{total}} \quad (10)$$

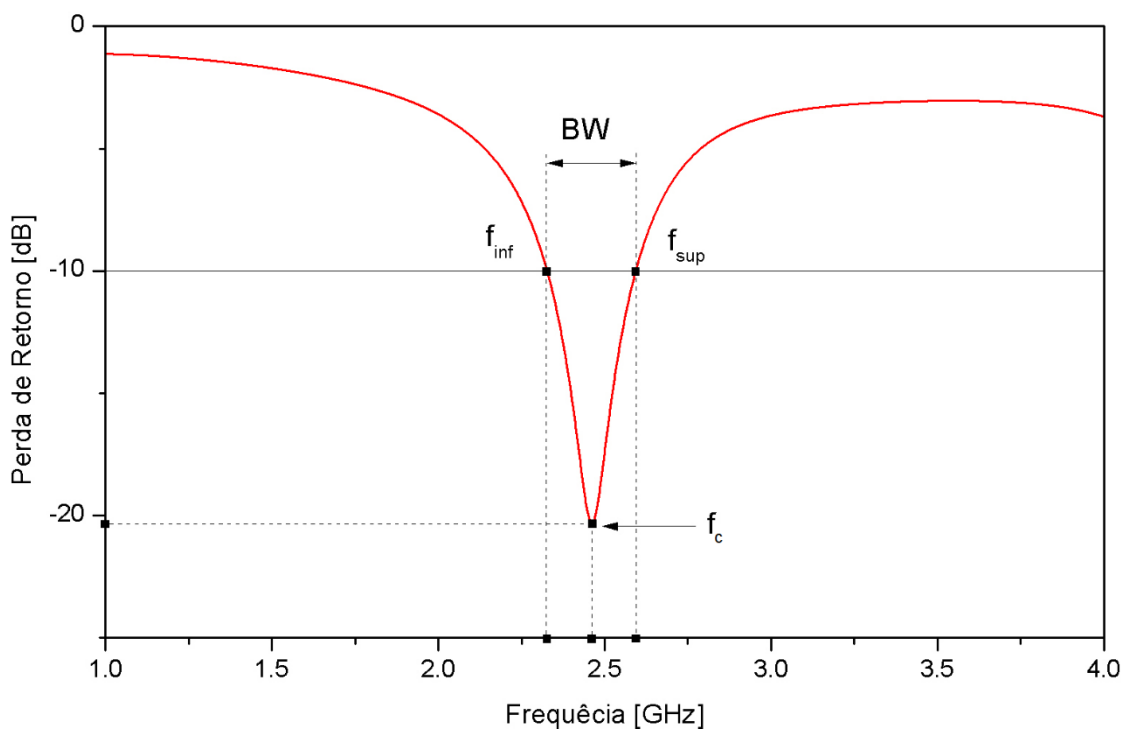
Como  $0 \leq \eta_{\text{rad}} \leq 1$ , no caso ideal, a antena não possui perdas ôhmicas e então, o ganho e a diretividade assumem o mesmo valor.

#### 2.1.1.5 Frequência de Ressonância e Largura de Banda

Segundo Filho (2010), a largura de banda pode ser definida como a faixa de frequências em torno de sua frequência central de operação (ou frequência de ressonância), que, por sua vez, é o valor da frequência no ponto onde ocorre menor perda de retorno, sendo considerado abaixo de -10 dB. Quanto maior a largura de banda de uma antena, mais elevada é sua capacidade de receber e transmitir sinais em diversas frequências. A Figura 7 ilustra um

exemplo de gráfico de perda de retorno em função da frequência, mostrando que a frequência central ( $f_c$ ) é o valor obtido através da média aritmética da faixa de frequência de operação da antena, limitada pela frequência inferior ( $f_{inf}$ ) e a frequência superior ( $f_{sup}$ ). A partir de um determinado valor em dB, nesse caso -10 dB, as frequências são definidas.

Figura 7 - Gráfico da perda de retorno em função da frequência mostrando as frequências e a largura de banda de uma antena.



**Fonte:** Autoria Própria.

Assim, a largura de banda de uma antena ( $BW - Band Width$ ) pode ser definida como sendo a faixa de frequências em torno de sua frequência de operação, considerando-se os dois pontos com perda de retorno igual a -10 dB, podendo ser expressa pela seguinte equação (CARNEIRO FILHO, 2010):

$$BW = f_{sup} - f_{inf} \quad (11)$$

Na prática, a largura de banda pode ser classificada de duas formas: antenas de banda estreita e as antenas de banda larga. Nas antenas de banda estreita, a largura de banda é bem



menor que a frequência central de operação, sendo expressa sob forma percentual e calculada com base na seguinte equação (GHAVAMI, 2004):

$$BW = \frac{f_{\text{sup}} - f_{\text{inf}}}{f_c} \times 100\% = \frac{2(f_{\text{sup}} - f_{\text{inf}})}{f_{\text{sup}} + f_{\text{inf}}} \times 100\% \quad (12)$$

Já as antenas de banda larga, onde a frequência superior é maior ou igual que o dobro da frequência inferior, possui uma largura de banda usualmente descrita pela razão entre estas frequências, como explicita a Equação (13):

$$BW = \frac{f_{\text{sup}}}{f_{\text{inf}}} \quad (13)$$

A Equação (12) é a forma mais usual de se calcular a largura de banda de uma antena. De acordo com a largura de banda percentual, as antenas podem ser classificadas da seguinte forma (FILHO, 2010):

- Banda estreita, com  $0\% < BW < 1\%$
- Banda Larga, com  $1\% \leq BW \leq 20\%$
- Banda Ultra Larga, com  $BW > 20\%$

Dependendo das necessidades de operação do sistema no qual a antena é utilizada, a largura de banda será limitada por um ou vários dos seguintes fatores: impedância de entrada, ganho, largura de feixe, posição do lobo principal, nível dos lobos secundários e polarização (BALANIS, 2009). Entre as diversas técnicas que visam aumentar a largura de banda de uma antena de microfita, destacam-se: a utilização de material dielétrico de baixa permissividade, aumento na espessura do substrato, abordagem de múltiplas ressonâncias (BULLA, 2011) e, a redução do comprimento do plano de terra (YARMAN, 2008).

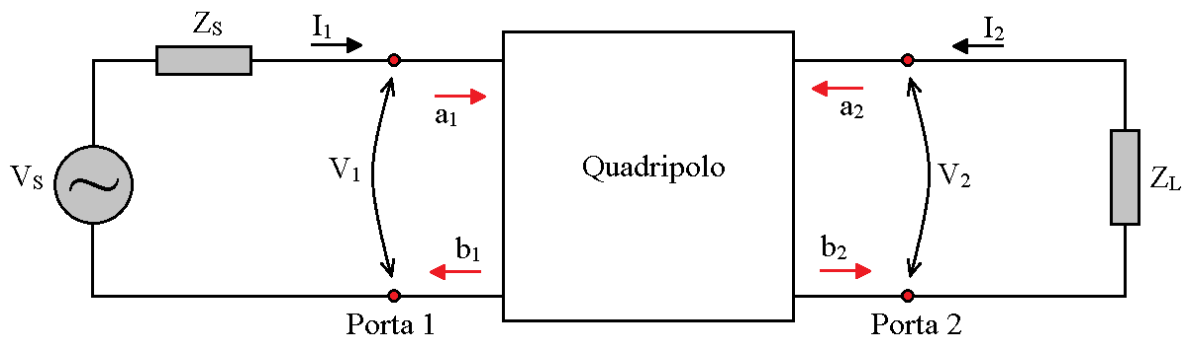
#### 2.1.1.6 Perda de Retorno

A perda de retorno ( $RL - \text{Return Loss}$ ) é um dos principais parâmetros a ser avaliado de uma antena, sobretudo na fase do projeto, pois ele indica a relação entre a potência fornecida e a potência refletida podendo ser obtida através da seguinte expressão (POZAR, 2012):

$$RL = -20 \log |\Gamma| \quad (14)$$

Outra maneira de se obter esse parâmetro é através da matriz de espalhamento (matriz  $S$ ), que, segundo Pozar (2012) é a representação mais adequada para medições diretas de ondas incidentes, refletidas e transmitidas. Analogamente as matrizes de impedância e admitância para linhas de transmissão, é utilizada a análise de quadripolo. De acordo com Anderson (1967), esse técnica é eficaz e muito utilizada para avaliar sistemas de micro-ondas pois facilita as medições e funciona em circuitos de altas frequências. Como a modelagem de linha de transmissão é aplicável à alimentação das antenas, os parâmetros de espalhamento estão diretamente relacionados com a eficiência de operação das antenas (SILVA, 2014). A Figura 8 ilustra o modelo de quadripolo, onde  $a_1$  e  $a_2$  e,  $b_1$  e  $b_2$  representam, respectivamente as ondas de tensões complexas normalizadas incidentes e refletidas,  $Z_S$  é a impedância da fonte geradora do sinal e  $Z_L$  a impedância da carga.

Figura 8 - Modelo de quadripolo.



**Fonte:** Autoria própria.

A partir das tensões e correntes de entrada ( $V_1$  e  $I_1$ ) e saída ( $V_2$  e  $I_2$ ), as variáveis independentes ( $a_1$  e  $a_2$ ) e dependentes ( $b_1$  e  $b_2$ ) são definidas através das seguintes equações (ANDERSON, 1967):

$$a_1 = \frac{V_1 + Z_0 I_1}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{onda de potência incidente na porta 1}}{2\sqrt{Z_0}} \quad (15)$$

$$a_2 = \frac{V_2 + Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{onda de potência incidente na porta 2}}{2\sqrt{Z_0}}$$

$$b_1 = \frac{V_1 - Z_0 I_1}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{onda de potência refletida na porta 1}}{2\sqrt{Z_0}} \quad (16)$$

$$b_2 = \frac{V_2 - Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{onda de potência refletida na porta 2}}{2\sqrt{Z_0}}$$

onde  $Z_0$  representa uma impedância de referência. A partir das Equações 15 e 16, é possível obter relações lineares entre os parâmetros que podem ser representadas na forma matricial descrita abaixo:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

onde  $S_{11}$  é o coeficiente de reflexão na porta 1,  $S_{12}$  representa o ganho de tensão reversa,  $S_{21}$  o ganho de tensão direta e  $S_{22}$  o coeficiente de reflexão na porta 2. Os termos  $S_{ij}$  são chamados de parâmetros de espalhamento do quadripolo (ANDERSON, 1967). O parâmetro  $S_{11}$  possui relação direta com a perda de retorno, tendo a mesma definição de  $\Gamma$ . Assim, a partir da Equação 14 é possível obter a perda de retorno através do  $S_{11}$  de acordo com seguinte equação (POZAR, 2014):

$$RL = -20 \log |S_{11}| \quad (18)$$

Na prática uma perda de retorno é considerada aceitável quando seus valores são menores que -10 dB (SILVA, 2014).

#### 2.1.1.7 Carta de Smith

A carta de Smith é uma indicação gráfica da variação da impedância da linha de transmissão a medida que o sinal se move ao longo desta (SADIKU, 2004). De acordo com Pozar (2014), é de suma importância utilizar a carta de Smith no projeto de uma antena, pois, através dela é possível obter a impedância da linha de transmissão e os compensadores que serão usados com o intuito de permitir um melhor casamento de impedância entre a carga e a linha de transmissão.

Diversos parâmetros podem ser extraídos e estudados a partir da carta de Smith, tais como: coeficiente de reflexão, transformar o coeficiente de reflexão em forma de impedância normalizada equivalente, impedância da linha de transmissão, entre outros (POZAR, 2014). Segundo Chan e Harter (2000), a carta de Smith é construída a partir da análise da carga no ponto em que a impedância deve ser casada. Desse modo, a reprodução das impedâncias por

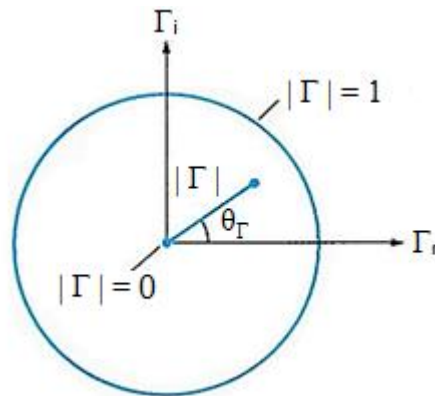
meio dos coeficientes de reflexão é mais conveniente para estabelecer a representação gráfica da relação entre o coeficiente de reflexão e a impedância da carga.

A carta de Smith é construída no interior de um círculo de raio unitário ( $\Gamma \leq 1$ ), como ilustra a Figura 9. Seu traçado é baseado na Equação 8 que pode ser reescrita como (SADIKU, 2004):

$$\Gamma = |\Gamma| \angle \theta_{\Gamma} = \Gamma_r + j\Gamma_i \quad (19)$$

onde  $\Gamma_r$  e  $\Gamma_i$  correspondem, respectivamente, as partes real e imaginária do coeficiente de reflexão.

Figura 9 - Círculo unitário no qual a carta de Smith é construída.  $\theta$



Fonte: SADIKU, 2004.

Segundo Sadiku (2004), com o intuito de se obter uma carta que serve para todos os tipos de linha de transmissão, é feita a normalização da impedância da carga por meio de uma impedância característica ( $Z_0$ ), assim, a impedância de carga ( $Z$ ) é representada por:

$$Z = r + jx \quad (20)$$

onde  $r$  e  $x$  representam, nessa ordem, a resistência e a reatância normalizada da carga. Substituindo a Equação 20 na Equação 8 e igualando a Equação 19, obtêm-se a Equação 21 que relaciona a impedância normalizada com o coeficiente de reflexão.

$$r + jx = \frac{(1 + \Gamma_r) + j\Gamma_i}{(1 - \Gamma_r) - j\Gamma_i} \quad (21)$$

Normalizando e igualando os termos encontra-se essa relação em termos de suas componentes imaginárias e reais separadamente, como descrito nas Equações 22 e 23 (SADIKU, 2004):

$$r = \frac{1 - \Gamma_r^2 + \Gamma_i^2}{(1 - \Gamma_r)^2 - \Gamma_i^2} \quad (22)$$

$$x = \frac{2\Gamma_i}{(1 - \Gamma_r)^2 - \Gamma_i^2} \quad (23)$$

Rearranjando as Equações 22 e 23, obtemos as seguintes relações:

$$\left[ \Gamma_r - \frac{r}{1+r} \right]^2 + \Gamma_i^2 = \left[ \frac{1}{1+r} \right]^2 \quad (24)$$

$$[\Gamma_r - 1]^2 + \left[ \Gamma_i - \frac{1}{x} \right]^2 = \left[ \frac{1}{x} \right]^2 \quad (25)$$

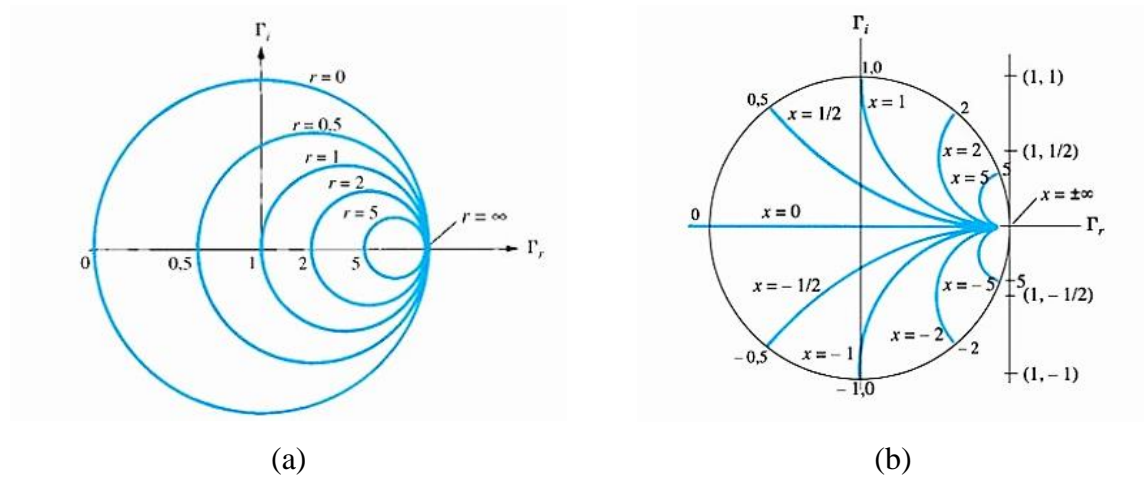
As Equações 24 e 25 são similares a equação geral de uma circunferência e descrevem o comportamento gráfico e características dos círculos resistivos (Equação 26) e dos círculos de reatância (Equação 27), respectivamente como segue:

$$\text{centro em } (\Gamma_r, \Gamma_i) = \left( \frac{1}{1+r}, 0 \right) \text{ e raio} = \frac{1}{1+r} \quad (26)$$

$$\text{centro em } (\Gamma_r, \Gamma_i) = \left( 1, \frac{1}{x} \right) \text{ e raio} = \frac{1}{x} \quad (27)$$

A resolução da Equação 26 para diferentes valores de  $r$ , fornecem um conjunto de circunferências, como ilustra a Figura 10.a. Já a Figura 10.b descreve o comportamento gráfico dos círculos de reatância obtidos através da resolução da Equação 27 para diversos valores de  $x$ , sendo estes limitados pela circunferência de raio unitário.

Figura 10 - Conjunto de Círculos (a) Resistivos e (b) de Reatância.



Fonte: SADIKU, 2004.

Segundo Sadiku (2004), a sobreposição dos círculos resistivos e de reatância obtidos formam a carta de Smith.

#### 2.1.1.8 Densidade de Corrente e Tangente de Perdas

As cargas livres presentes em materiais condutores, quando submetidas a ação de um campo elétrico externo, são acumuladas na superfície, ocasionando o aparecimento de uma corrente na superfície desse condutor. Segundo Sadiku (2004), a densidade de corrente ( $J$ ) dada em  $A/m^2$ , pode ser descrita como a corrente ( $\Delta I$ ) que atravessa uma determinada área ( $\Delta S$ ), se está área for unitária e normal a um determinado ponto, pode ser expressa por:

$$J = \frac{\Delta I}{\Delta S} = \rho_v u \quad (28)$$

onde  $\rho_v$  é a densidade do fluxo de cargas [ $C/m^3$ ] e  $u$  é a velocidade de deriva [ $m/s$ ]. Essas grandezas podem ser calculadas através das equações:

$$\rho_v = -ne \quad (29)$$

$$u = \frac{-e\tau}{m} E \quad (30)$$

sendo  $-e$  a carga do elétron [C],  $n$  o número de elétrons,  $m$  a massa do elétron [Kg],  $\tau$  o intervalo de tempo médio entre as colisões [s] e  $E$  o campo elétrico. Assim, para materiais condutores a Equação 28 pode ser reescrita na forma pontual da lei de Ohm como (SADIKU, 2004):

$$\mathbf{J} = \frac{ne^2\tau}{m} \mathbf{E} = \sigma \mathbf{E} \quad (31)$$

onde  $\sigma$  é a condutividade do material [S].

Quando materiais dielétricos são expostos a presença de um campo elétrico, ocorre a polarização de seus átomos, a. Esse aumento é descrito pelo vetor de polarização elétrica  $P_e$ . Dessa forma, o fluxo elétrico total é descrito pela seguinte equação (POZAR, 2012):

$$\vec{\mathbf{D}} = \epsilon_0 \vec{\mathbf{E}} + \vec{\mathbf{P}}_e \quad (32)$$

Em um meio linear, a polarização elétrica pode ser linearmente relacionada a aplicações de campo elétrico a partir da expressão:

$$\vec{\mathbf{P}}_e = \epsilon_0 X_e \vec{\mathbf{E}} \quad (33)$$

onde  $X_e$  é a suscetibilidade elétrica do material e  $\epsilon_0$  é a constante de permissividade do vácuo ( $\approx 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m). Substituindo a Equação 33 em 32 e, rearranjando os termos, tem-se:

$$\vec{\mathbf{D}} = \epsilon \vec{\mathbf{E}} \quad (34)$$

onde  $\epsilon$  é a permissividade complexa do meio que descreve como o material se comporta quando submetido a um campo elétrico, quantificando a facilidade com que este permite a passagem desse campo. A permissividade elétrica pode ser descrita pela seguinte equação (POZAR, 2012):

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 + X_e) = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (35)$$

Na Equação 35 a parte real da permissividade elétrica (constante dielétrica),  $\epsilon'$ , é uma medida da quantidade de energia armazenada em um material a partir de um campo elétrico

externo e, a parte imaginária (fator de perdas),  $\varepsilon''$ , é a quantidade de dissipação ou perdas de energia (calor) devido ao amortecimento dos momentos de dipolo vibrantes (POZAR, 2012). Materiais dielétricos são caracterizados por possuir uma permissividade relativa ( $\varepsilon_r$ ) real específica com  $\varepsilon' = \varepsilon_r \varepsilon_0$ .

Através da equação de onda de Maxwell para o campo magnético  $\vec{H}$  e, assumindo uma dependência temporal do tipo  $e^{j\omega t}$ , os termos derivativos da equação podem ser substituídos por  $j\omega$ , onde a frequência angular ( $\omega = 2\pi f$ ) é dada em rad/s. Assim:

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \vec{D} + \vec{J} \quad (36)$$

Reescrevendo a Equação 36 em termos do campo elétrico, obtêm-se:

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \varepsilon' \vec{E} + (\sigma + \omega \varepsilon'') \vec{E} \quad (37)$$

O termo  $(\sigma + \omega \varepsilon'')$  representa a condutividade efetiva total do material, e expressa uma relação, que não pode ser descrita separadamente, entre o fator de perdas devido ao amortecimento dielétrico ( $\omega \varepsilon''$ ) e as perdas por condutividade do material ( $\sigma$ ). A razão entre a parte real e imaginária da Equação 37 define a tangente de perdas ( $\tan \delta$ ) do material:

$$\tan \delta = \frac{\sigma + \omega \varepsilon''}{\omega \varepsilon'} \quad (38)$$

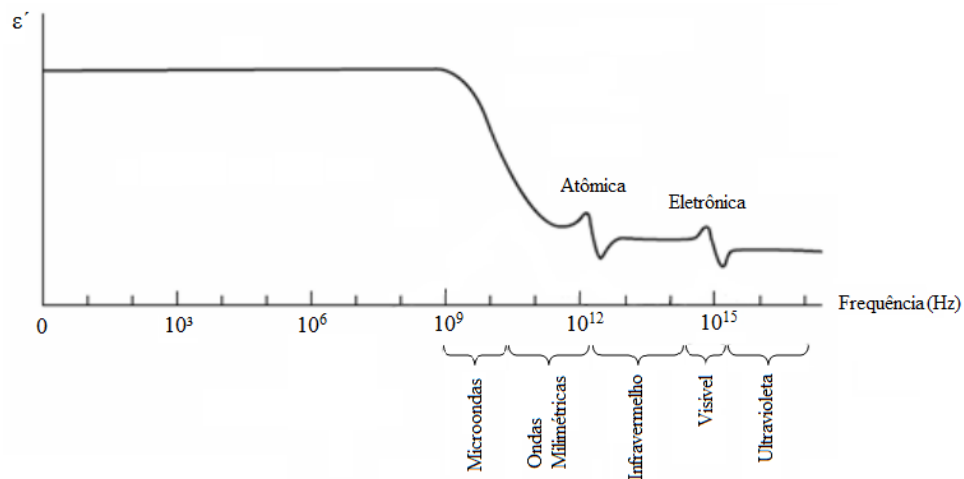
É importante ressaltar que para a faixa de micro-ondas, onde os valores de frequência são elevados, o termo  $\omega \varepsilon''$  se torna muito maior que  $\sigma$ , fazendo com que Equação 38 se resuma a:  $\tan \delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$ . De acordo com Souza (2015), quanto maior a tangente de perdas, maior energia dispersa na forma de calor para o ambiente (efeito Joule), implicando em perda de energia irradiada quando os materiais apresentam valores significativos para essa grandeza. Um ressonador dielétrico com baixas perdas dielétricas deve apresentar um valor de tangente de perdas inferior a 0,001 (CARNEIRO FILHO, 2010).

Quando um meio dielétrico é submetido ação de um campo elétrico alternado externo, os dipolos do material tendem a se reorientar com o campo, em um determinado tempo finito. Segundo Callister (2007), os tipos fundamentais de polarização podem ser classificados em atômica (iônica e dipolar), que ocorrem só em materiais iônicos e/ou que possuem momentos dipolo permanentes; e eletrônica, presente em todos os átomos. De acordo com Bernal (2010),

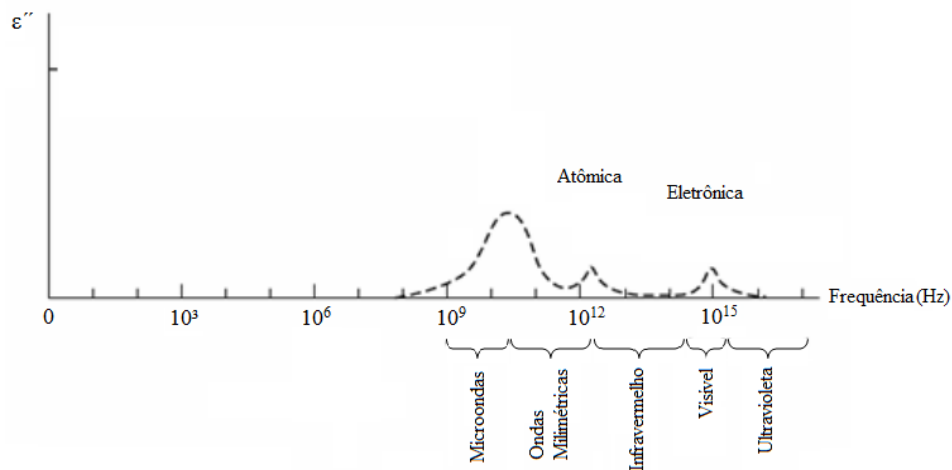


para cada tipo de polarização supracitado, existe uma frequência de relaxação, que é definida como o inverso do tempo mínimo de reorientação dos dipolos. Quando a frequência do campo aplicado ultrapassa a frequência de relaxação de um dipolo, este não pode alcançar a direção de orientação e, portanto, não contribui com a constante dielétrica (BERNAL, 2010). A Figura 11, apresenta o comportamento gráfico da constante dielétrica e do fator de perdas, respectivamente, em função da frequência (em escala logarítmica), para um material que apresenta ambos os tipos de polarização.

Figura 11 - Exemplo de variação típica da (a) constante dielétrica e do (b) fator de perdas de um material com a frequência do campo aplicado.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de BERNAL, 2010.

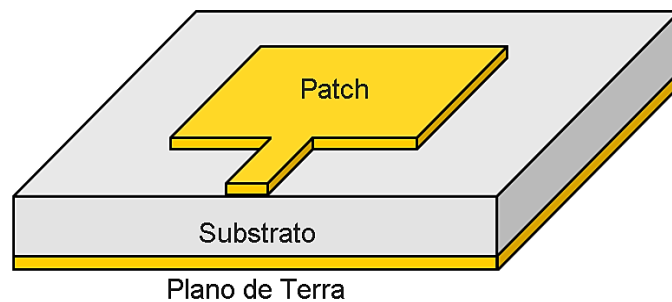
Os picos de ressonância em função da frequência apresentados na Figura 11, estão relacionados de acordo com o mecanismo de perda (CHEN et al., 2004). Dessa forma, em

regime alternado de baixas frequências, as perdas são ocasionadas pela energia perdida no processo de transformação do movimento de oscilação das cargas em agitação térmica. Em altas frequências, as perdas estão associadas a relaxação iônica e de dipolos elétricos. Ao aumentar mais a frequência, ocorre a absorção por vibrações dos átomos, e finalmente, às frequências ainda mais elevadas têm-se as transições (BERNAL, 2010).

### 2.1.2 Estrutura

Na sua configuração mais simples, a antena de microfita consiste em um *patch* radiante em um dos lados do substrato dielétrico, enquanto no outro lado existe um plano de terra, como ilustra a Figura 13.

Figura 12 - Configuração básica de uma antena de microfita.



**Fonte:** Autoria Própria.

Nas seções seguintes cada um desses elementos será abordado separadamente, onde serão descritas suas respectivas funções e características.

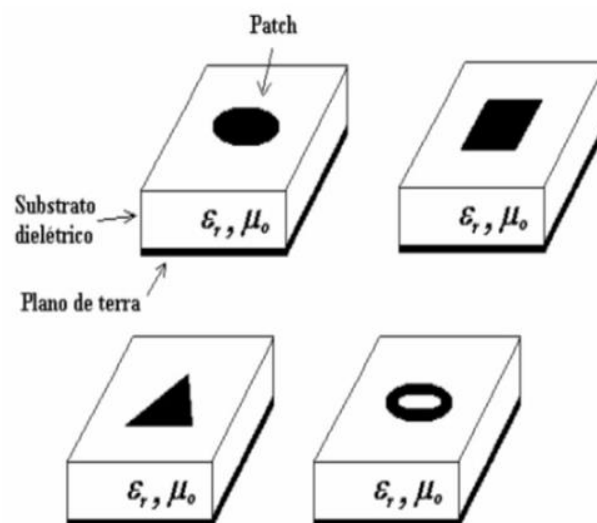
#### 2.1.2.1 Patch

O *patch* é uma lâmina metálica normalmente condutora, embora haja situações em que esse metal atue como supercondutor (MEDEIROS, 2013). O metal normalmente utilizado em sua composição é o cobre mas, em aplicações como ondas milimétricas, utiliza-se ouro, devido a sua maior condutividade elétrica (FILHO, 2010). Ele é tido como o componente irradiador

das antenas de microfita e, tem uma espessura muito fina em comparação ao comprimento de onda no espaço livre.

Quanto à sua forma, o *patch* influencia na distribuição de corrente e, conseqüentemente, no perfil do campo da superfície da antena (MEDEIROS, 2013). Em alguns projetos pode apresentar formato geométrico irregular, como no caso dos fractais, no entanto, é usual trabalhar com as formas regulares (retangular e circular) em decorrência da facilidade de sua análise. A Figura 14 ilustra algumas formas geométricas que o elemento irradiador

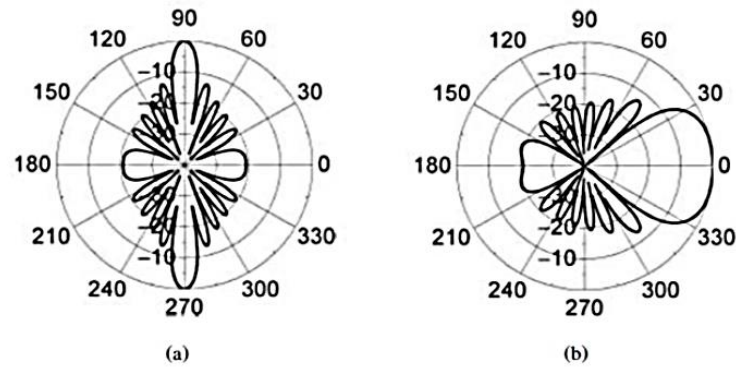
Figura 13 - Formas geométricas assumidas pelo *patch*.



Fonte: MEDEIROS, 2013.

Esses componentes podem ser combinados entre si, constituindo estruturas novas, denominadas de arranjos de microfita. Cada arranjo pode gerar distintos diagramas de radiação, com base em sua quantidade de componentes, na sua disposição e no espaçamento entre eles. Ao ajustar esses parâmetros, é possível se obter duas configurações fundamentais de radiação: *broadside*, onde os elementos são posicionados de modo que a radiação aconteça ortogonalmente ao plano de terra, e *end-fire*, cujo objetivo é que isso ocorra numa direção tangencial, como ilustra a Figura 15.

Figura 14 - Diagramas de radiação: (a) Arranjo *Broadside*; (b) Arranjo *End-Fire*.



Fonte: MEDEIROS, 2013.

Nesse sentido, o *patch* normalmente é projetado para assumir um comportamento *broadside* mas, devido à baixa eficiência das antenas de microfita, grande parte da potência termina sendo usada na formação de lóbulos secundários (laterais e traseiro) em direções totalmente indesejadas (MEDEIROS, 2013).

#### 2.1.2.2 Plano de Terra

Analogamente ao *patch*, o plano de terra também é constituído por uma fita metálica, localizada na superfície inferior do substrato da antena, possuindo uma função refletora, impedindo o desenvolvimento de um lóbulo traseiro mais intenso, além de atuar como um mecanismo de aterramento. Em teoria, o plano de terra é geralmente admitido como sendo infinito, com o intuito de facilitar os cálculos. Na prática, usa-se um plano um pouco maior do que os limites do substrato para simular essa característica (MEDEIROS, 2013).

O plano de terra truncado é uma técnica capaz de aumentar a banda das antenas (BALANIS, 2009). Entretanto, ao fazer isso, são inseridas mais discontinuidades na microfita, ocasionando aumento das ondas superficiais. Uma alternativa mais assertiva para ampliar a faixa de frequência de operação de uma antena é a inclinação do plano de terra, que têm-se mostrado eficiente, dada sua capacidade de se adaptar a novos ângulos de inclinação sem a necessidade de reprojeter a antena (ARAÚJO, 2011).

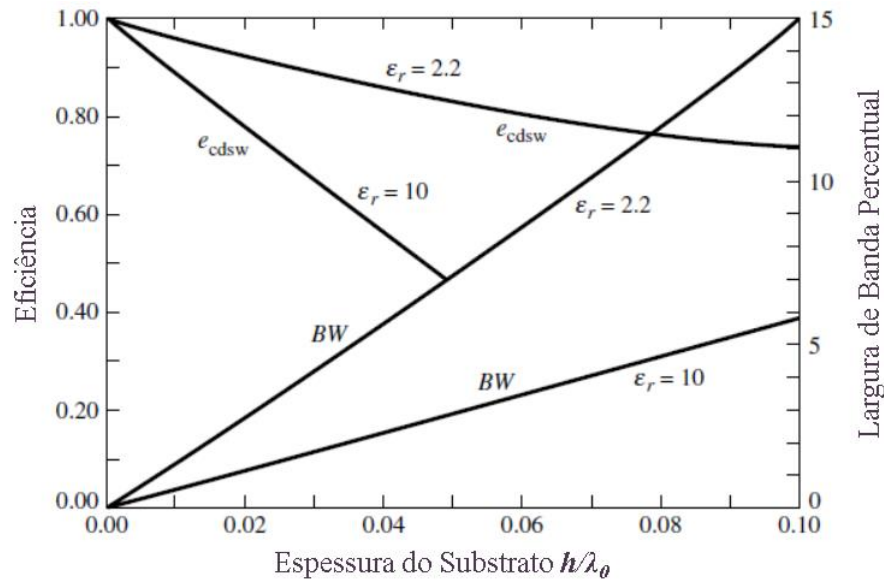
### 2.1.2.3 Substrato

O substrato é um dos componentes fundamentais das antenas de microfita. Localizado entre o *patch* e o plano de terra, é constituído por materiais dielétricos e, funciona como um capacitor armazenando energia de acordo com a frequência de operação. Sua geometria, suas características mecânicas e suas propriedades eletromagnéticas influenciam de forma significativa no confinamento dos campos, na radiação, no acoplamento, nas perdas e na largura de banda da antena, sendo responsáveis pelo surgimento de fenômenos eletromagnéticos como: propagação em modo quase TEM (Transversal Eletromagnético), surgimento de ondas de superfície e comportamento anisotrópico (BARROS, 2012).

São propriedades indispensáveis para fabricação de um substrato que compõe um projeto de antena de microfita: baixas tangentes de perdas e elevadas taxas de homogeneidade do material. Os substratos mais usados atualmente utilizam constantes dielétricas entre  $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$  (CAETANO, 2014).

Os substratos almejáveis para um melhor desempenho da antena são os mais espessos, que possuem constantes dielétricas mais baixas, uma vez que eles proporcionam uma eficiência elevada e maior largura de banda, entretanto, são mais dispendiosos em sua produção em decorrência do maior consumo de material tendo em vista à maior espessura do substrato. Já os substratos mais delgados com constantes dielétricas altas são adequados para circuitos que operam na faixa de microondas, visto que eles demandam limites de campo para tornar mínimo acoplamentos e irradiações indesejáveis. Esses substratos são úteis pois proporcionam menores dimensões dos elementos constituintes da estrutura, contudo sua grande perda torna-os menos eficientes e com uma estreita largura de banda. A Figura 16 mostra a influência da variação das propriedades de espessura e permissividade elétrica do substrato na eficiência e largura de banda de uma antena de microfita.

Figura 15 - Efeitos da espessura do substrato e da constante dielétrica na largura de banda e eficiência da antena.



Fonte: Adaptado de POZAR, 1992.

O processo de escolha do substrato influencia parâmetros da antena como: frequência de ressonância, eficiência, largura de banda e dimensões físicas. Dentre os tipos de substratos existentes destacam-se: Anisotrópicos, Isotrópicos, *MTF* (*Multi Frame Joiner*), Material *PBG* (*Photonic Bang Gap*), entre outros.

Substratos isotrópicos são aqueles cujo comportamento do campo elétrico aplicado independe da direção do campo. Já os substratos anisotrópicos apresentam comportamento de um campo elétrico aplicado dependente da direção do campo elétrico ou dos eixos do material. Os Materiais *PBG* são uma nova classe de substratos periódicos. As ondas eletromagnéticas comportam-se em substratos fotônicos como elétrons comportam-se em semicondutores (FAN et al., 1998). E, o *MTF* é um exemplo de substrato moderno que é desenvolvido com tecnologia proprietária em filme fino. Esse substrato é utilizado em antena planares para aplicação em laptops, espessura de 0,2 mm,  $\epsilon_r=3$  e a sua finalidade é oferecer estabilidade a antena, isolamento aos dispositivos metálicos internos e maiores (CAETANO, 2014).

Em eletrônica e micro-ondas, a constante dielétrica relativa dos materiais determina as dimensões do dispositivo a ser projetado. Segundo Moliton (2007), o comprimento de onda ( $\lambda$ ) de uma onda eletromagnética num meio dielétrico é expresso pela seguinte equação:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (39)$$

onde  $\lambda_0$  é o comprimento de onda da onda no vácuo. De acordo com a Equação 39, o tamanho de um dispositivo fabricado com um determinado material dielétrico pode ser consideravelmente reduzido se o valor de  $\epsilon_r$  for alto, sendo esta uma forma relativamente simples de miniaturizar dispositivos (KRETLY et al., 2004).

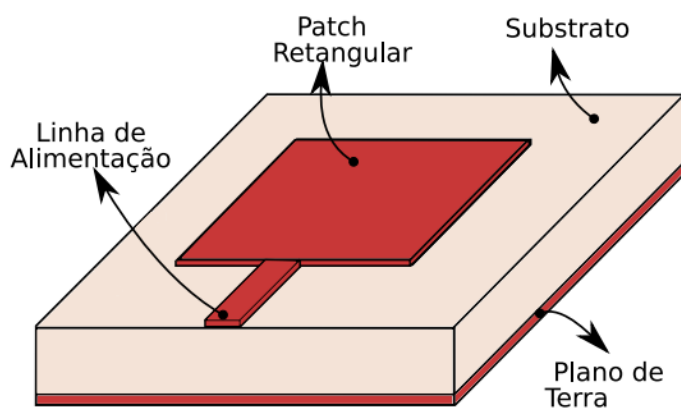
### 2.1.3 Métodos de Alimentação

As técnicas de alimentação são um importante parâmetro do projeto, uma vez que influenciam na impedância de entrada e, conseqüentemente, nas outras características de uma antena de microfita. Entre os métodos de alimentação do *patch*, destacam-se os seguintes: linha de alta impedância, cabo coaxial, acoplamento por abertura e acoplamento por proximidade. Todos esses métodos serão descritos nas seções posteriores.

#### 2.1.3.1 Linha de Alta Impedância

A estrutura da linha de alta impedância é composta por uma fita condutora impressa sobre o mesmo plano do substrato que o *patch* e, apoiado sobre o plano de terra. Esta configuração permite que a estrutura da antena continue inteiramente planar, tornando-a adequada em aplicações de circuitos integrados de micro-ondas. A Figura 17 representa um exemplo de alimentação através de linha de alta impedância.

Figura 16 - Alimentação por linha de alta impedância.



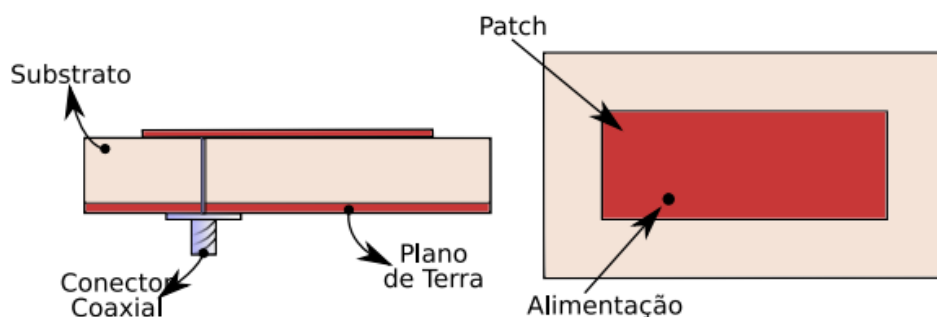
Fonte: AQUINO, 2008.

Neste tipo de alimentação, obtêm-se melhor casamento de impedância, uma vez que pode-se ajustar a impedância ajustando o alimentador (MEDEIROS, 2013). Quando este tipo de alimentação é utilizado em substratos com espessuras maiores, ocorre um aumento na largura de banda da antena, porém, aumentam-se as radiações indesejadas na alimentação (SILVA, 2008).

### 2.1.3.2 Cabo Coaxial

Na alimentação por cabo coaxial, a parte ativa da ponta de prova transpassa o substrato e é conectada ao *patch*, enquanto o conector externo é ligado ao plano de terra. Esse esquema está representado na Figura 18.

Figura 17 - Alimentação por cabo coaxial.



Fonte: AQUINO, 2008.

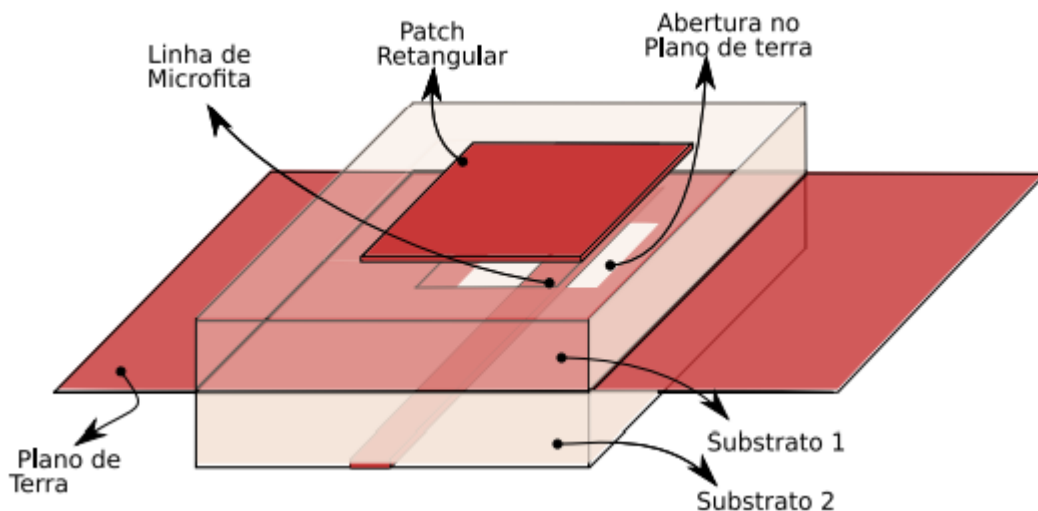
Essa alimentação possui como vantagem a simplicidade de projeto no que diz respeito ao ajuste do valor da impedância de entrada, sendo este, feito através do posicionamento do ponto de alimentação. No entanto, apresenta largura de banda estreita, e para a implementação de arranjos demanda um grande número de conexões de solda, tornando sua produção difícil e comprometendo seu desempenho. Para substratos mais espessos, pontas de prova mais largas são necessárias, constituindo um problema, pois gera um aumento na radiação espúria e na potência das ondas de superfície (MEDEIROS, 2013).

### 2.1.3.3 Acoplamento por Abertura



Diferente dos métodos anteriores que utilizam uma conexão física direta entre as estruturas, o uso de técnicas indiretas de acoplamento suprimem a produção de radiação de polarização cruzada causada pelos modos de ordens superiores. O acoplamento por abertura é constituído basicamente por três substratos, dois deles separados por um plano de terra que possui uma abertura, como ilustra a Figura 19.

Figura 18 - Alimentação por acoplamento por abertura.



Fonte: AQUINO, 2008.

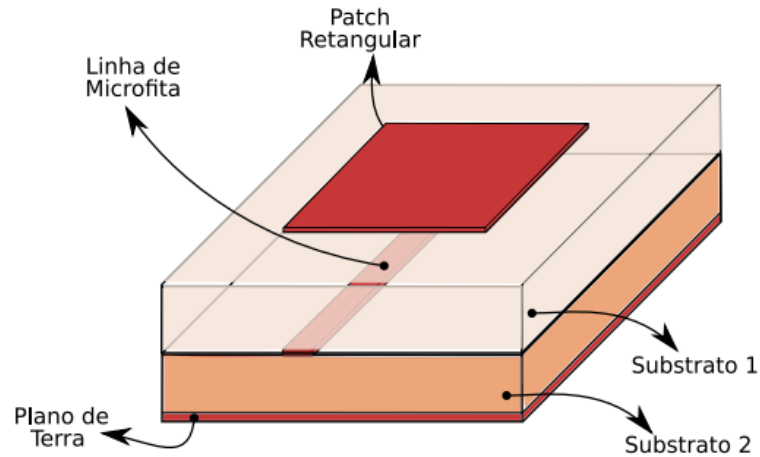
Na face superior do substrato inferior existe uma linha de microfita, cuja energia se acopla ao *patch* por meio de uma abertura existente no plano de terra localizado na face superior do substrato intermediário. Geralmente, o dielétrico médio é composto por um material que apresenta alta permissividade relativa ( $\epsilon_r$ ), enquanto o substrato superior é mais espesso e possui uma baixa  $\epsilon_r$ . O substrato inferior tem em sua base um plano de terra que auxilia no confinamento de energia do sistema. O isolamento entre a fonte e o radiador minimiza a radiação espúria e garante pureza de polarização (MEDEIROS, 2013). As principais desvantagens desse método são sua difícil implementação e estreita largura de banda.

#### 2.1.3.4 Acoplamento por Proximidade

Esse método de alimentação é semelhante à do acoplamento por abertura; entretanto, não apresenta uma fissura no plano de terra. O *patch*, situado na parte superior da estrutura, é

acoplado a linha de microfita que encontra-se inserida entre dois substratos, atravessando, assim, um dos substratos, como mostra a Figura 20.

Figura 19 - Alimentação por acoplamento por proximidade.



Fonte: AQUINO, 2008.

Entre as quatro técnicas de alimentação aqui descritas, a de acoplamento por proximidade proporciona a maior largura de banda, uma modelagem simples e a uma baixa radiação espúria (BALANIS, 2009). O maior entrave encontra-se no que diz respeito a montagem da estrutura.

#### 2.1.4 Métodos de Análise e Projeto

As antenas de microfita apresentam particularidades geométricas e propriedades elétricas que podem ser interpretadas como vantagens e desvantagens dependendo da aplicabilidade escolhida. O modelamento da antena está relacionado às características das estruturas, tais como, tipo de substrato, dimensões e geometria do *patch*. Diversos são os métodos de análise relatados na literatura para caracterização da antena. Esses métodos podem ser divididos em dois grupos (FILHO, 2010).

No primeiro grupo encontra-se o modelo de onda completa, baseado na distribuição de corrente elétrica no *patch* condutor e no plano de terra. Esse modelo não considera resultados empíricos, possui rigorosas formulações matemáticas e, conseqüentemente, maior esforço computacional e analítico, fornecendo deste modo, resultados mais precisos sobretudo em altas frequências (VASCONCELOS, 2006). Entre os métodos numéricos relacionados aos modelos

de onda completa destacam-se: o Método dos Momentos (*MoM – Method Of Moments*), o Métodos dos Elementos Finitos (*FEM – Finite Element Method*) e, Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (*FDTD – Finite Difference Time Domain*).

No segundo grupo estão os modelos aproximados, baseados na distribuição de corrente magnética equivalente ao redor das margens do *patch*, simplificando o mecanismo de radiação das antenas de microfita e, desconsiderando fenômenos como a propagação de ondas de superfície e a dispersão (FILHO, 2010). Entre os principais modelos aproximados estão: Modelo de Linha de Transmissão (*TLM – Transmission Line Method*), Modelo de Rede Multiporta (*MNM – Multiport Network Model*) e o Modelo da Cavidade.

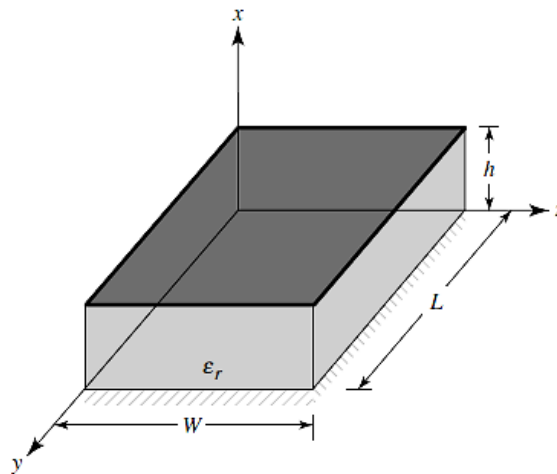
Dentre os modelos citados, serão brevemente descritos dois dos modelos aproximados mais usuais devido sua simplicidade de cálculo e resultados satisfatórios para as faixas de frequência abordadas neste trabalho, são eles o *TLM* e o Modelo da Cavidade. Além disso, será abordado o método de casamento de impedância através de *Inset feed*, que melhora o desempenho da antena.

#### 2.1.4.1 Modelo da Cavidade

O Modelo da Cavidade, basicamente, trata a antena como uma cavidade circundada por paredes elétricas, no topo e na base, e por paredes magnéticas nos contornos laterais (FILHO, 2010). Os campos nas antenas são considerados como os campos da cavidade, sendo expandidos em termos de modos ressonantes na cavidade, cada um com sua frequência de ressonância. Este modelo pode ser utilizado para diversos tipos de geometria regulares onde não se utiliza altas frequências e não seja necessária muita precisão.

Através do modelo da cavidade é possível demonstrar que uma antena de microfita retangular pode ser representada como um conjunto de duas estreitas aberturas (fendas) riantes, cada uma com largura  $W$  e altura  $h$ , separadas por uma distância  $L$ , como ilustra a Figura 21.

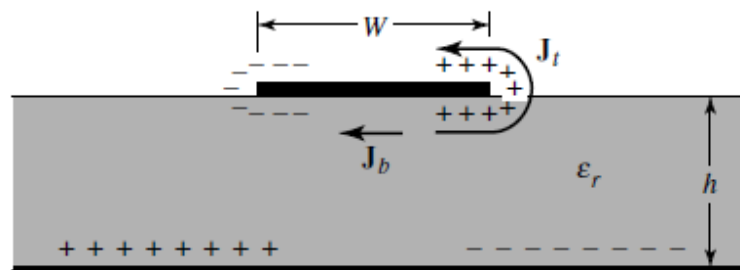
Figura 20 - Geometria de uma plaqueta retangular de microfita para o modelo da cavidade.



Fonte: BALANIS, 2005.

Ao energizar-se a o *patch* é estabelecida uma distribuição de cargas em suas superfícies inferior ( $J_b$ ) e superior ( $J_t$ ), da mesma forma que na superfície do plano de terra, como ilustra a Figura 22.

Figura 21 - Distribuição de cargas e densidade de corrente na antena de microfita.



Fonte: BALANIS, 2005.

Essa distribuição é controlada por dois mecanismos: um atrativo, entre as cargas de sinais opostos existentes entre o plano de terra e a parte inferior do *patch*; e um repulsivo, entre as cargas de mesmo sinal na superfície inferior do *patch*, que direciona as cargas para as bordas de sua face superior. Essa movimentação de cargas cria densidades de corrente ( $J_t$  e  $J_b$ ) nas superfícies do *patch*. Segundo Balanis (2009), devido a razão entre a espessura e a largura da maioria das microfitas ser muito pequena, o mecanismo atrativo domina e a maior parte da concentração de cargas e densidade de corrente se estabelece na superfície superior do *patch*, atenuando a medida que a razão entre a espessura e a largura diminui.

Devido à estreita espessura da microfita, as ondas geradas no interior do substrato dielétrico sofrem reflexões consideráveis quando atingem as bordas da plaqueta. Como a altura do substrato é muito pequena ( $h \ll \lambda$ , onde  $\lambda$  é o comprimento da onda no interior do dielétrico), os campos ao longo dessa espessura são considerados constantes e o efeito de franjamento dos campos nas bordas também se torna ínfimo, sendo o campo elétrico quase normal a superfície do *Patch*. Assim, apenas as configurações de modo  $TM^x$  serão consideradas no interior da cavidade, admitindo as faces do *patch* como condutores perfeitos e as paredes laterais consideradas condutoras magnéticas perfeitas (BALANIS, 2009).

As configurações de campo no interior da cavidade podem ser descritas utilizando a abordagem de potencial vetorial, considerando o material dielétrico do substrato truncado e com constante dielétrica  $\epsilon_r$ . Cujas soluções podem ser escritas utilizando a técnica de separação de variáveis como:

$$A_x = [A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x)] [A_2 \cos(k_y y) + B_2 \sin(k_y y)] [A_3 \cos(k_z z) + B_3 \sin(k_z z)] \quad (40)$$

onde  $k_x$ ,  $k_y$  e  $k_z$  são os números de onda ao longo das direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente. Os campos elétricos e magnéticos no interior da cavidade são relacionados pelo potencial vetorial através das equações (BALANIS, 2009):

$$\begin{aligned} E_x &= j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k^2 \right) A_x & H_x &= 0 \\ E_y &= j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left( \frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} \right) & H_y &= \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial z} \\ E_z &= j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left( \frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} \right) & H_z &= -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial y} \end{aligned} \quad (41)$$

As seguintes condições de contorno são utilizadas:

$$\begin{aligned} E_y(x'=0, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) &= E_y(x'=h, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = 0 \\ H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z'=0) &= H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z'=W) = 0 \\ H_z(0 \leq x' \leq h, y'=0, 0 \leq z' \leq W) &= H_z(0 \leq x' \leq h, y'=L, 0 \leq z' \leq W) = 0 \end{aligned} \quad (42)$$

onde  $x'$ ,  $y'$  e  $z'$ , são usadas para representar os campos no interior da cavidade. Aplicando-se as condições de contorno a Equação 40, é possível encontrar os números de onda através das equações (BALANIS, 2009):

$$\begin{aligned} k_x &= \left(\frac{m\pi}{h}\right), m=0, 1, 2, \dots \\ k_z &= \left(\frac{p\pi}{W}\right), p=0, 1, 2, \dots \\ k_y &= \left(\frac{n\pi}{L}\right), n=0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (43)$$

onde  $m$ ,  $n$ ,  $p$  são diferentes de zero e representam, nessa ordem, o número de variações do campo em meio período ao longo das direções  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Segundo o Balanis (2009), como os números de onda são sujeitos a equação de separação, as frequências de ressonância da cavidade são dadas por:

$$(f_r)_{mnp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2} \quad (44)$$

O modo com a frequência mais baixa é definido como modo dominante, sendo determinado a partir da ordenação das frequências de ressonâncias em ordem crescente. Segundo Guerra (2016), quando o conjunto de Equações 41 é aplicado ao vetor de Poynting, a potência irradiada pela antena é definida, possibilitando o cálculo da impedância de entrada ( $R_{in}$ ), como demonstra a Equação 45.

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad (45)$$

Onde  $G_1$  e  $G_{12}$  são, respectivamente, a autocondutância da antena e condutância mútua decorrente dos campos eletromagnéticos emitidos pelo ressoador. Essas características podem ser calculadas através das Equações 46 e 47 (BALANIS, 2005).

$$G_1 = \int_0^\pi \frac{\left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \sin^3\theta}{120\pi^2} d\theta \quad (46)$$

$$G_{12} = \int_0^\pi \frac{\left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \sin^3\theta}{120\pi^2} J_0(K_0 L \sin\theta) d\theta \quad (47)$$

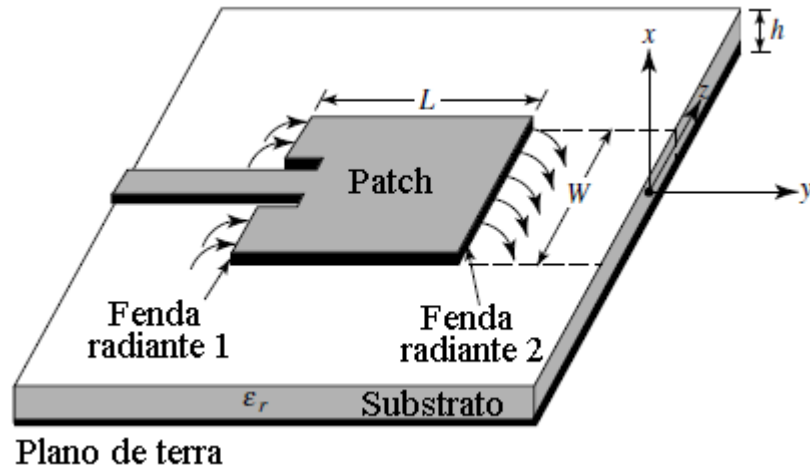
Onde  $k_0$  é o número de onda no espaço livre,  $W$  e  $L$  são, em ordem, a largura e o comprimento do *patch*, e  $J_0$  é a função de Bessel de primeira ordem e argumento  $x$ . As soluções para essas equações podem ser obtidas através da implementação computacional de métodos numéricos, tais como integração por retângulos, por exemplo. Dessa forma, o valor de  $R_{in}$ , conseqüentemente, possuirá um erro associado em decorrência da aproximação usada pelo método escolhido. No entanto, o valor encontrado é utilizado para reajuste de acordo com a técnica de casamento de impedância (JAMES, 1989).

#### 2.1.4.2 Modelo da Linha de Transmissão

O Modelo da Linha de Transmissão possibilita a determinação de diversos parâmetros da antena, tais como a frequência de ressonância, o diagrama de radiação e a impedância de entrada (FILHO, 2010). Apesar de ser um dos métodos mais simples e pouco exato, produz resultados satisfatórios e proporciona uma facilidade em obter-se o casamento de impedância da estrutura, sendo mais recomendado para antenas que tenham o *patch* quadrado ou retangular.

O modelo da linha de transmissão representa a antena de microfita por duas fendas separadas por uma linha de transmissão de baixa impedância  $Z_c$  e comprimento  $L$ , como ilustra a Figura 23.

Figura 22 - Antena de microfita retangular.



Fonte: Adaptado de BALANIS, 2005.

Neste modelo as dimensões do *patch* são finitas em largura e comprimento, assim, os campos nas bordas da plaqueta sofrem o efeito de franjamento. A quantidade de franjamento está relacionada a espessura do substrato e as dimensões do *patch*. Para o plano E principal (plano x-y) o franjamento depende da razão entre o comprimento  $L$  do *patch* e a espessura  $h$  do substrato ( $L/h$ ) e da constante dielétrica ( $\epsilon_r$ ) do substrato (BALANIS, 2009). Mesmo o franjamento sendo reduzido para antenas de microfita, tem que ser considerado pois afeta a frequência de ressonância da antena.

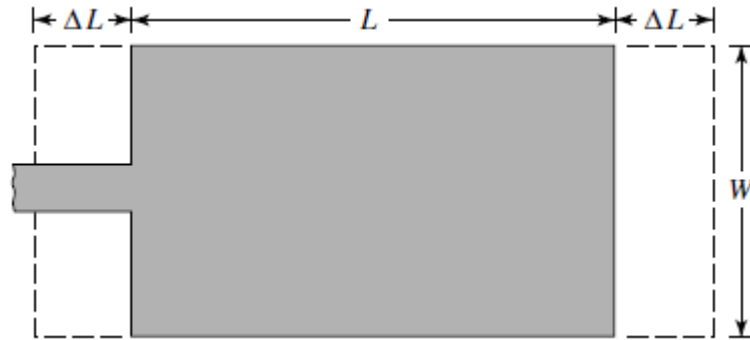
O franjamento dos campos pelas bordas faz com que a antena de microfita tenha dimensões elétricas maiores do que as físicas, sendo necessária a introdução de uma constante dielétrica efetiva que considere esse efeito. Os valores iniciais da constante dielétrica efetiva são ditos valores estáticos e dados por (BALANIS, 1989):

$$\epsilon_{\text{ref}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (48)$$

para  $W/h > 1$ , onde a largura do *patch* ( $W$ ). A Figura 24, ilustra as dimensões do *patch* estendidas ao longo do seu comprimento em cada extremidade por uma distância  $\Delta L$ .



Figura 23 - Comprimento físico e efetivo de um *patch* retangular.



Fonte: BALANIS, 2005.

Segundo Hammerstad (1975), a extensão normalizada do comprimento pode ser calculado através da seguinte prática popular:

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{\text{ref}} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{\text{ref}} + 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \quad (49)$$

A partir dessa formulação simplificada, é possível calcular os demais parâmetros de projeto de antenas de microfitas de *patch* retangular, assumindo que se tenha as seguintes especificações: frequência de ressonância ( $f_r$ ), espessura do substrato ( $h$ ) e constante dielétrica do substrato ( $\epsilon_r$ ). Assim, para valores práticos de largura e comprimento utiliza-se (BAHL; BHARTIA, 1980):

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} - 2\Delta L \quad (50)$$

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{ref}}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (51)$$

De acordo com Silva (2014), a alimentação através de linha de microfitas pode ser usada como técnica para o casamento de impedância. Levando-se em consideração a permissividade efetiva, o comprimento da linha de microfitas deve ser igual ou inferior a 1/4 do comprimento de onda da maior frequência de ressonância da antena (POZAR, 2012), sendo obtida através da expressão:

$$L_0 = \frac{c}{4f_r \sqrt{\epsilon_{\text{ref}}}} \quad (52)$$

A Equação 53, mostra, como é determinada, a largura  $W_0$  da linha de microfita segundo Balanis (2009).

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{ref}}}} \ln \left( \frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right), & \frac{W_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{ref}}} \left[ \frac{W_0}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left( \frac{W_0}{h} + 1,444 \right) \right]}, & \frac{W_0}{h} > 1 \end{cases} \quad (53)$$

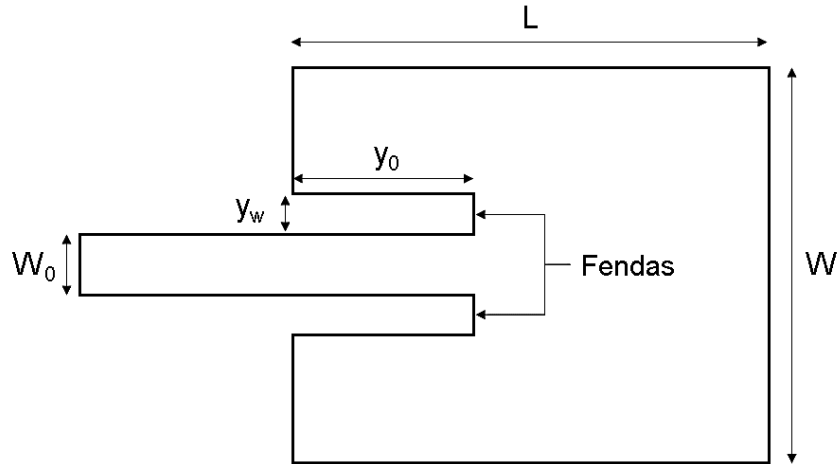
Onde  $L_0$  é o comprimento da linha de microfita,  $Z_0$  a impedância da linha de microfita e  $W_0$  a largura da linha de microfita. Segundo Balanis (2009), quando  $W_0/h > 1$ , a solução da Equação 50 é obtida por meio de métodos numéricos admitindo o valor ideal da impedância de entrada  $Z_0$  igual a  $50 \Omega$ .

#### 2.1.4.3 Inset Feed

Embora existam diversos modelos e métodos numéricos de projeto precisos, em alguns casos, ocorrem problemas oriundos da diferença de valores entre as impedâncias de entrada e de saída. Essa diferença ocasiona diversas perdas no sistema, tornando necessária a implementação de reajustes no projeto objetivando minimizá-la. Deste modo, técnicas de casamento de impedância são desenvolvidas com o intuito de obter a máxima transferência de energia entre a linha de alimentação e a antena, aumentando a eficiência desta.

O *inset feed*, é um método de casamento de impedância aplicado às antenas de microfita onde são inseridas duas fendas retangulares paralelas à linha de alimentação, como ilustra a Figura 25. Essas fendas são dimensionadas com espessuras iguais a da camada condutora do ressoador e com comprimentos e larguras definidas de acordo com a modelagem aplicada (GUERRA, 2016).

Figura 24 - *Inset Feed* aplicado ao *patch* de uma antena de microfita.



**Fonte:** Autoria própria.

O comprimento  $y_0$  do *inset feed*, pode ser determinado através da Equação 54, para valores de permissividade  $2 \leq \epsilon_r \leq 10$ , a fim de aproximar a impedância de entrada da linha de microfita ao valor de  $50 \Omega$  (RAMESH e YIP, 2003).

$$y_0 = 10^4 (0,001699\epsilon_r^7 + 0,13761\epsilon_r^6 - 6,1783\epsilon_r^5 + 93,187\epsilon_r^4 - 682,69\epsilon_r^3 + 2561,9\epsilon_r^2 - 4043\epsilon_r + 6697) \frac{L}{2} \quad (54)$$

Onde  $L$  é o comprimento do *patch*, e  $\epsilon_r$  é a permissividade do material. Para esse e outros valores de impedância pode-se utilizar a Equação 55 (BALANIS, 2005):

$$y_0 = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} [R_{in} 2(G_1 \pm G_{12})] \quad (55)$$

Onde  $R_{in}$  é a impedância de entrada e  $G_1$  e  $G_{12}$  são condutâncias da antena, ambos calculados através das equações 45, 46 e 47 (ver seção 2.1.4.1), respectivamente. A dimensão da largura ( $y_w$ ) do *inset feed* pode ser calculada de acordo com a Equação 56 (MATIN e SAYEED).

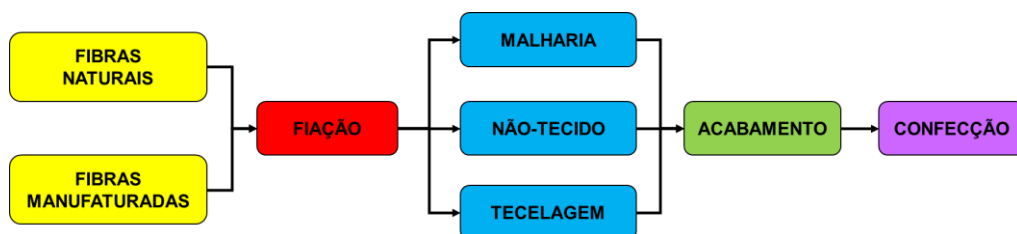
$$y_w = \frac{c}{\sqrt{2\epsilon_{ref}}} \frac{4,65 \times 10^{-12}}{f_r} \quad (56)$$

Contudo,  $y_w$  pode variar de acordo com o projeto, sendo utilizada a mesma largura da linha de transmissão ( $W_0$ ) (ARAÚJO et al., 2011), a metade da largura  $W_0$  (LUNA et al., 2013) ou até uma razão de  $W_0/40$  (MATIN e SAYEED, 2010). A estimativa de qual proporção utilizar geralmente é feita através de simulações em *softwares* utilizando como base os resultados encontrados na literatura de projetos similares ou o valor encontrado através da Equação 56.

## 2.2 TECIDOS

Tecidos são materiais planares compressíveis, flexíveis, fibrosos e porosos cujas propriedades são determinadas principalmente pelas propriedades das fibras que os compõem e pela disposição dos fios (CAVALCANTE, 2014). A Figura 25 ilustra o fluxograma da cadeia produtiva têxtil, que, segundo Pereira (2008), integra desde a produção de fibras (sintéticas, artificiais e naturais) até o acabamento/beneficiamento e abastecendo as indústrias do setor de confecções.

Figura 25 - Processo produtivo da cadeia têxtil.



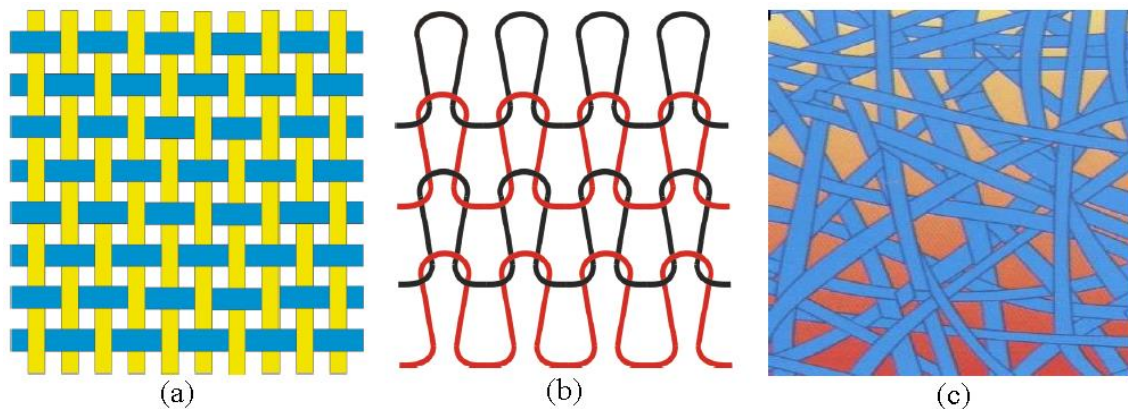
**Fonte:** Adaptado de PERREIRA, 2008.

Após a obtenção das fibras, estas são submetidas ao processo de fiação, onde se fabricam os fios com as propriedades desejadas (titulação, composição, etc.) através de três métodos básicos distintos: Via Seca (cordagem), Via Úmida e Via Fundida (Extrusão). O processo de fiação, compreende diversas operações, por meio das quais as fibras são abertas, limpas e orientadas em uma mesma direção, paralelizadas e torcidas de modo a se prenderem umas às outras por atrito (PEREIRA, 2009). O processo de torção exerce grande influência na resistência do fio, sendo este mais rígido e resistente quanto maior for a torção utilizada. Segundo Pereira (2009) a produção de filamento contínuo envolve alta tecnologia e possui poucas máquinas, pois o fio é formado na primeira etapa do processo, enquanto o processo de

fibras descontínuas, que pode trabalhar com máquinas para fibras curtas ou fibras longas, é mais complexo e exige uma sequência de máquinas bem maior que o processo de filamento contínuo, já que para produzir o fio fiado é necessário abrir, limpar, afinar, torcer a massa de fibras.

Posteriormente os fios são entrelaçados compondo a estrutura do material, que, por sua vez, pode ser classificado como: tecido plano, tecido malha ou não-tecido, como ilustra a Figura 26.

Figura 26 - Estruturas têxteis de (a) Tecido Plano; (b) Tecido de Malha; (c) Não-Tecido



Fonte: Adaptado de SOUZA PEREIRA, 2009.b.

Nos tecidos planos os fios de trama e urdume (ver Figura 39) são entrelaçados de modo perpendicular formando uma armação rígida, enquanto nos tecidos de malha ocorre o entrelaçamento de fios utilizando técnicas de formação de laçadas (ver Figura 41), criando uma estrutura flexível. A estrutura e geometria dos artigos de tecido plano diferenciam-se substancialmente dos tecidos de malha, e ambas podem ser vistas com mais detalhes nas seções 2.2.2.1 e 2.2.2.2, respectivamente.

De acordo com a NBR 13370 (apud PEREIRA, 2009.b), não-tecido é uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída de véu ou manta, que consiste em uma estrutura formada por uma ou mais camadas de fibras ou filamentos. Essas mantas podem ser formadas por fibras orientadas de forma direcional ou ao acaso, e, são geralmente consolidadas por processos: mecânicos (fricção – agulhagem, hidroentrelaçamento, costura), químicos (adesão – resinagem), térmicos (coesão – termoligamento) ou combinação destes.

### 2.2.1 Fibras Têxteis

De acordo com o Conselho Nacional de Metrologia (2001), fibras têxteis são elementos filiformes que possuem características como flexibilidade, finura e grande comprimento em relação à dimensão transversal máxima, estando aptas para aplicações têxteis. As fibras podem ser de origem natural quando extraídas na natureza sob uma forma que as torna prontas para o processamento têxtil, ou de origem não natural quando produzidas por processos industriais (KUASNE, 2008).

As fibras têxteis são distribuídas de acordo com sua composição química e sua estrutura molecular. Independem de sua origem, geralmente, o elemento carbono está presente em sua estrutura molecular, ligado na maioria das vezes com outros elementos como o hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e elementos alógenos, como flúor, cloro e iodo (SOUZA PEREIRA, 2009.a). O modo como esses elementos estão conectados, determinam a forma das cadeias poliméricas e, afetam as características e propriedades das fibras, como: elasticidade, alongamento, absorção, resistência, entre outras. A Tabela 2 mostra a classificação das principais fibras têxteis utilizadas no setor industrial, apresentando as siglas e suas respectivas composições.

Tabela 2 - Classificação das fibras têxteis.

| <b>FIBRAS TÊXTEIS</b> |              |                   |             |
|-----------------------|--------------|-------------------|-------------|
| <b>Classificação</b>  | <b>Sigla</b> | <b>Composição</b> |             |
| <b>Natural</b>        | Vegetal      | CO                | Algodão     |
|                       |              | CC                | Coco        |
|                       |              | CJ                | Juta        |
|                       |              | CL                | Linho       |
|                       |              | CS                | Sisal       |
|                       |              | CR                | Rami        |
|                       | Animal       | WO                | Lã          |
|                       |              | S                 | Seda        |
|                       | Mineral      | A                 | Amianto     |
| <b>Manufaturada</b>   | Artificial   | CA                | Acetato     |
|                       |              | LA                | Borracha    |
|                       |              | CAR               | Carbono     |
|                       |              | MTF               | Metálica    |
|                       |              | MT                | Metalizadas |
|                       |              | CMD               | Modal       |
|                       |              | STF               | Rocha       |
|                       |              | SPF               | Soja        |
|                       |              | GF                | Vidro       |

| FIBRAS TÊXTEIS |           |            |               |
|----------------|-----------|------------|---------------|
| Classificação  | Sigla     | Composição |               |
|                | CV        | Viscose    |               |
|                | BAM       | Bambu      |               |
|                | Sintética | PAC        | Acrílico      |
|                |           | EL         | Elastano      |
|                |           | PES        | Poliéster     |
|                |           | PLA        | Milho         |
|                |           | PA         | Poliamida     |
|                |           | PP         | Polipropileno |
|                |           | PUR        | Poliuretana   |

**Fonte:** Adaptado de ABNT, 1992.

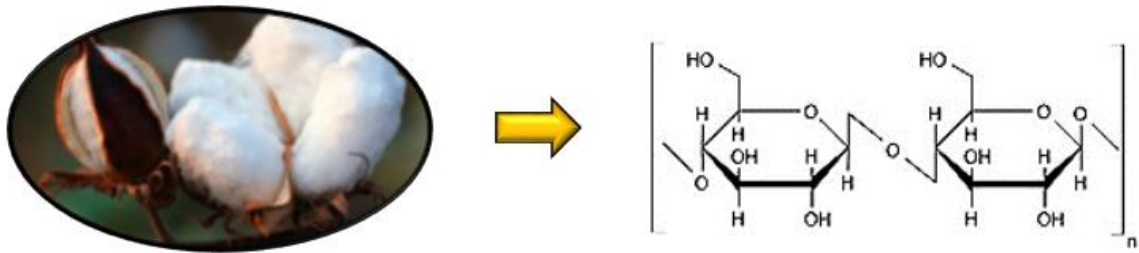
As fibras animais, também conhecidas como fibras proteicas, são compostas em sua estrutura química básica por aminoácidos. As fibras vegetais são constituídas por celulose natural, sendo derivadas de uma grande variedade de sementes, dos caules e das folhas das plantas. (SOUZA PEREIRA, 2009.a). Segundo a ABNT (1992), as fibras artificiais são obtidas a partir da transformação química e/ou mecânica de uma molécula ou macromolécula, já existente na natureza. Enquanto as fibras sintéticas são obtidas por meio de macromoléculas que precisam ser sintetizadas quimicamente. As subseções seguintes apresentam a constituição e as principais características das fibras têxteis que foram utilizadas para o estudo proposto.

#### 2.2.1.1 Algodão

O algodão (CO) é a fibra natural biodegradável mais utilizada na produção têxtil. De acordo com Souza Pereira (2009.a), o CO possui origem vegetal e sua fibra apresenta um comprimento que varia entre 24 e 38 mm, constituindo o revestimento piloso do fruto do algodoeiro (*Gossypium*). Esta planta possui um pequeno porte (cerca de 1,20 m de altura), onde após a floração, o ovário transforma-se numa cápsula que com a maturação estala, libertando um tufo de fibras, geralmente brancas, que são então colhidas (SOUZA PEREIRA, 2009.a).

A fibra de algodão é constituída por cerca de 90% a 93 % de cadeias poliméricas de celulose, representadas na Figura 27, sendo a maior parte restante composta por ceras, gorduras ou minerais, entre outros (KUASNE, 2008).

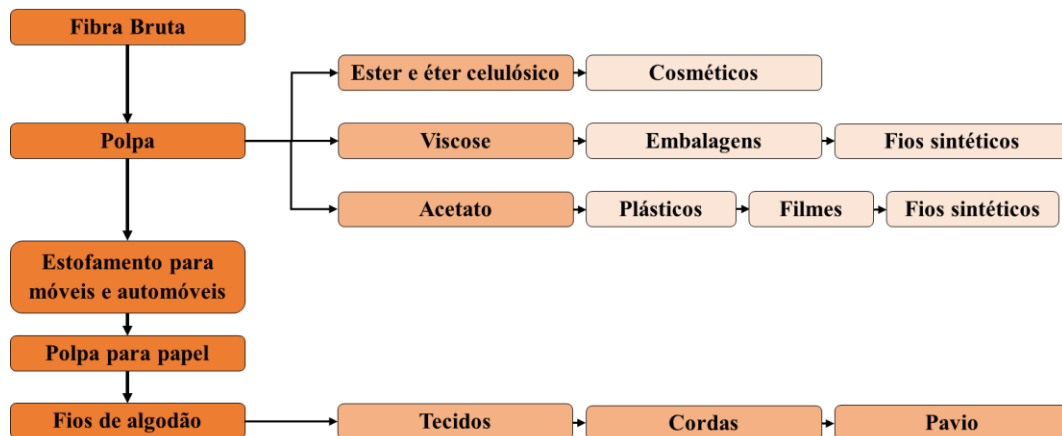
Figura 27 - Cadeia polimérica de celulose presente no tufo de fibra de algodão.



**Fonte:** Autoria Própria.

Entre as suas características destaca-se sua: durabilidade, resistência ao uso, à lavagem e insetos, além de possuir, segundo Aquino (2012), hidrofiliidade e boa condutividade de calor. Têm tendências a encolher e a amarrotar, queima com facilidade, não suporta ácidos e é suscetível a ataques de fungos (LIMA FILHO, 2009). De acordo com Assad et al. (2010), a fibra do algodão é principalmente utilizada em aplicações médicas, em móveis, na indústria automobilística e em várias outras indústrias, sendo a têxtil a de maior destaque. A Figura 28, mostra as principais aplicações da fibra de algodão.

Figura 28 - Principais usos da fibra de algodão.



**Fonte:** Adaptado de UNCTAD (2005 apud BATALHA; BUAINAIN, 2007).

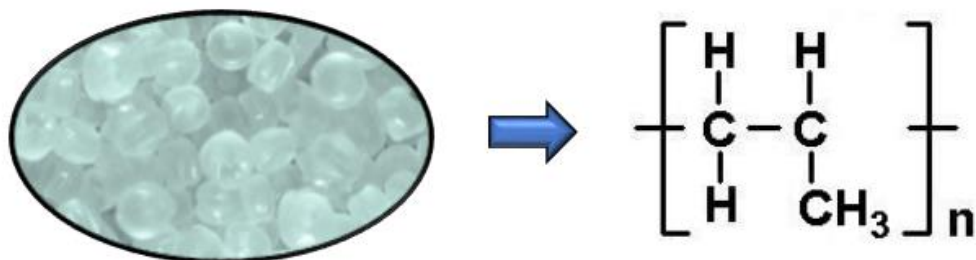
Segundo Lima Filho (2009), as principais vantagens do algodão, quando comparado as fibras sintéticas e artificiais, derivam principalmente do conforto referente ao toque agradável e frescura, absorção de água, resistência ao uso e também dos aspectos ecológicos, por ser biodegradável.



### 2.2.1.2 Polipropileno

O polipropileno é um material termoplástico semicristalino, como ilustra a Figura 29, que é obtido através da polimerização do gás propeno, que, por sua vez, é gerado por meio do craqueamento catalítico do petróleo.

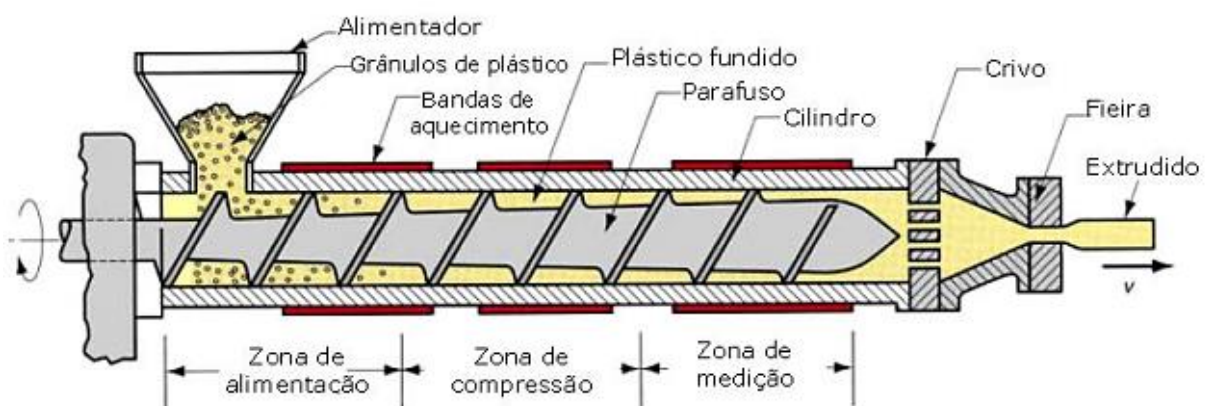
Figura 29 – Aparência e estrutura química do polipropileno.



Fonte: Autoria Própria.

A Fibra de Polipropileno (PP) é uma fibra sintética obtida a partir do método de extrusão do polipropileno. Nesse processo, o material semicristalino é fundido em uma máquina extrusora e forçado através de inúmeros furos minúsculos, formando as fibras, como ilustra a Figura 30.

Figura 30 - Processo de extrusão do polipropileno.



Fonte: GOMES PEREIRA, 2009.

O PP detêm propriedades de resistência à humidade, elevada inércia química, leveza, resistência à abrasão e à ação de mofos e bactérias, além de proporcionar excelente isolamento (LIMA FILHO, 2009).

### 2.2.1.3 Milho

A Fibra de Ácido Poliláctico (PLA – *Polylactic Acid*) é uma fibra sintética biodegradável obtida a partir de matéria vegetal, no caso deste trabalho, foi utilizado PLA obtido a partir da síntese do milho. Essa fibra consiste num poliéster alifático, produzido do Ácido Láctico (AL) por fermentação de açúcares seguida de purificação e polimerização (PRADELLA, 2006), como mostra a Figura 31.

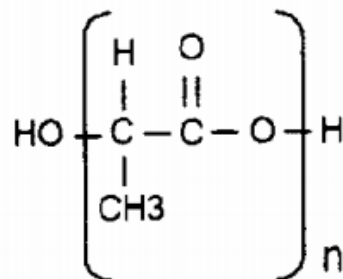
Figura 31 - Processo de obtenção da fibra de milho.



**Fonte:** Adaptado de PAIVA, 2010.

O processo de fabricação da fibra ocorre através da moagem do milho para obtenção do amido e açúcar. Em seguida, o açúcar é fermentado com enzimas criando ácido láctico que será futuramente purificado. Ao término deste procedimento obtêm-se pequenas placas de plástico, de cor branca opaca, de ácido poliáctico. Este composto final polimerizado, cuja estrutura molecular é apresentada na Figura 32, pode ser moldado em copos de plástico, embalagens ou ser processado na fibra Ingeo (PAIVA, 2010).

Figura 32 - Estrutura molecular do PLA.



**Fonte:** PRADELLA, 2006.

Segundo Lima Filho (2009), o PLA apresenta boas propriedades químicas e mecânicas sendo resistente à transpiração e a lavagens sucessivas. Essa fibra possui uma elevada

resistência térmica, absorção da humidade, secagem rápida e excelentes propriedades de isolamento, anti-odor, antibacteriana, anti-ultravioleta e não irrita a pele (PAIVA, 2010).

#### 2.2.1.4 Bambu

A Fibra de Bambu (BAM) possui origem natural, no entanto, é classificada como fibra artificial devido aos processos de regeneração da celulose obtida a partir da planta de bambu (*Dendrocalamus latiflorus*). Fibras de bambu são a resultante do processo pelo qual são utilizadas as plantas de Bambu, que por sua vez, parte inicialmente da produção de uma polpa grossa (celulose) que se afina para ser fiada (passada por orifícios), como ilustra a Figura 33. O fio de bambu pode ser 100% feito a partir do próprio bambu que é um material têxtil biodegradável.

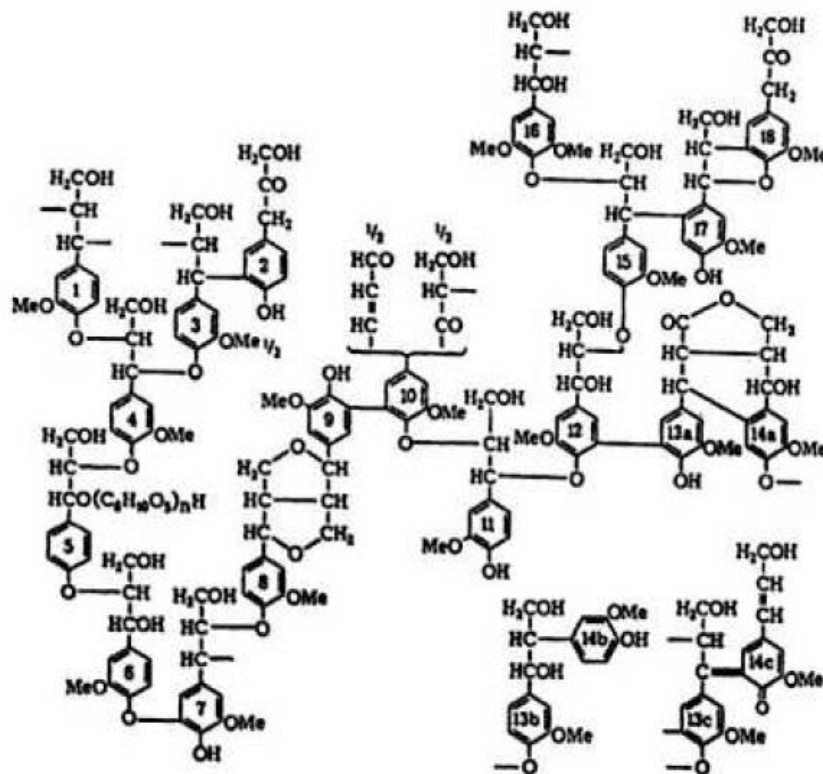
Figura 33 - Sequência da fabricação da fibra de Bambu.



**Fonte:** Adaptado de GRIPA, 2009.

A BAM é constituída em sua maior parte por celulose (26% - 43%) e lignina (21% - 31%). Segundo Grippa (2009), a lignina, ilustrada na Figura 34, é uma macromolécula tridimensional amorfa associadas à celulose encontrada nas plantas, cuja principal função é de atribuir rigidez, impermeabilidade e resistência contra ataques mecânicos e microbiológicos aos tecidos vegetais.

Figura 34 – Estrutura molecular parcial de um tipo de lignina.



Fonte: GRIPA, 2009.

De acordo com Lima Filho (2009), essa fibra possui funções naturais anti-bacterianas, hipoalergênica, além de ser muito absorvente e de secagem rápida. A fibra de bambu possui propriedades intrínsecas que resultam em roupas confortáveis, mais leves, que apresentam maiores sensações de frescor e ventilação, podendo ser utilizada sozinha ou combinada com outras fibras. (GRIPA, 2009).

#### 2.2.1.5 Soja

A soja é uma fonte natural renovável e de fácil cultivo, comercializada em larga escala, sendo os Estados Unidos o maior produtor, seguido do Brasil, Argentina, China, Índia e Paraguai (MARTINS, 2009). A fibra de soja (SPF - *Soybean Protein Fibres*) é classificada como artificial, uma vez que é proteica e obtida a partir da regeneração da semente de soja.

O processo de fabricação da fibra de soja tem início com a moagem do grão, na qual o óleo bruto (aproximadamente 20% do conteúdo do grão) é separado do farelo (pasta), de onde é possível extrair a proteína de soja, à qual são adicionadas enzimas biológicas e polímeros para

a concretização da fibra (MARTINS, 2009). Para finalizar o procedimento, a fibra passa pelo processo de ondulação ou texturização, termofixação e, em seguida é cortada com a dimensão necessária de acordo com a aplicação proposta (PAIVA, 2010). A Figura 38 ilustra os produtos obtidos durante o processo de fabricação da fibra de soja. Segundo Martins (2009), devido aos agentes auxiliares utilizados na produção das fibras, não serem tóxicos, evitando a poluição do ambiente, o SPF é designado uma “fibra têxtil verde”.

Figura 35 - Produtos obtidos durante processo de fabricação da fibra de soja.



**Fonte:** Autoria própria.

Essa fibra possui as qualidades das fibras naturais e as propriedades físicas das fibras sintéticas (LIMA FILHO, 2009). Segundo Aquino (2012), a fibra da soja possui uma grande conformidade na mistura com o algodão e outras fibras, melhorando as propriedades dos tecidos. Os tecidos derivados da fibra de soja são baratos e o mercado destas fibras tende a ampliar, uma vez que a procura por estas fibras é cada vez maior devido às variadas vantagens que as fibras de soja oferecem, tratando-se de um produto confortável, saudável e ecológico (PAIVA, 2010).

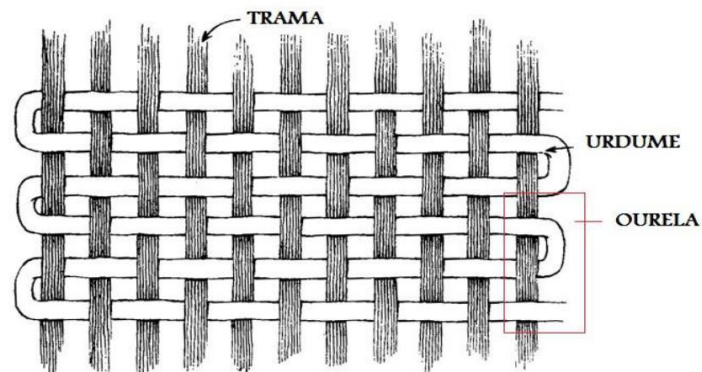
### 2.2.2 Estruturas Têxteis

As estruturas têxteis podem ser definidas como o entrelaçamento de fios que originam quatro tipos convencionais de estruturas de tecidos planos e malha: malha de trama, malha de teia, tafetá e sarja (LIMA FILHO, 2009). Nesta seção serão apresentados os principais tipos de estruturas têxteis dando ênfase a estrutura de malha, que foi a utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

### 2.2.2.1 Tecido Plano

O tecido plano é formado basicamente por fios de ourela, que formam as bordas do tecido, e pelo entrelaçamento perpendicular de dois grupos de fios: trama (dispostos no sentido transversal) e urdume (dispostos no sentido longitudinal), como apresentado na Figura 36.

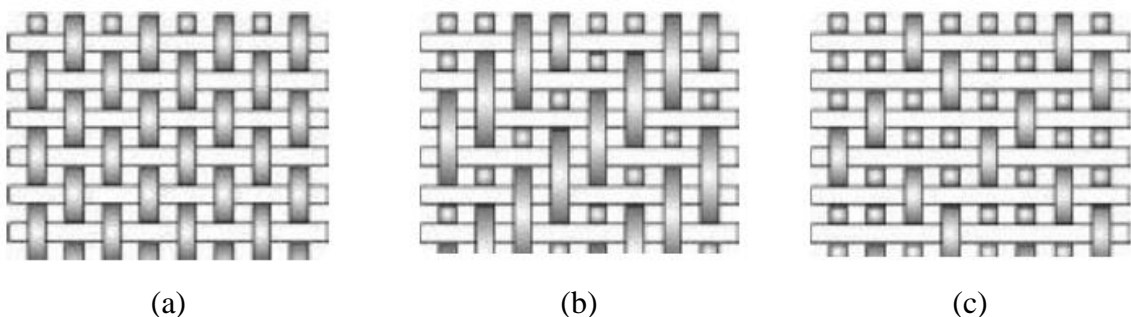
Figura 36 - Estrutura básica do tecido plano.



Fonte: SOUZA PEREIRA, 2009.b.

De acordo com Souza Pereira (2009.b), antes que os fios sejam entrelaçados nos teares, é necessária a realização de operações preliminares de preparação destes fios para sua utilização no processo de tecelagem, tanto para os fios de urdume quanto para os fios de trama, por métodos adequados, tais como o processo de urdimento e o processo de engomagem oriundos ao setor de preparação à tecelagem. Para tecidos planos, o entrelaçamento é o fato de passar uma ou vários fios de urdume por cima ou por baixo de um ou vários fios de trama, obtendo-se, dessa forma os mais diversos tipos de ligamento, entre eles destacam-se: o tafetá, a sarja e o cetim, como ilustra a Figura 37.

Figura 37 - Tipos de tecido plano. (a) Tafetá; (b) Sarja; (c) Cetim.

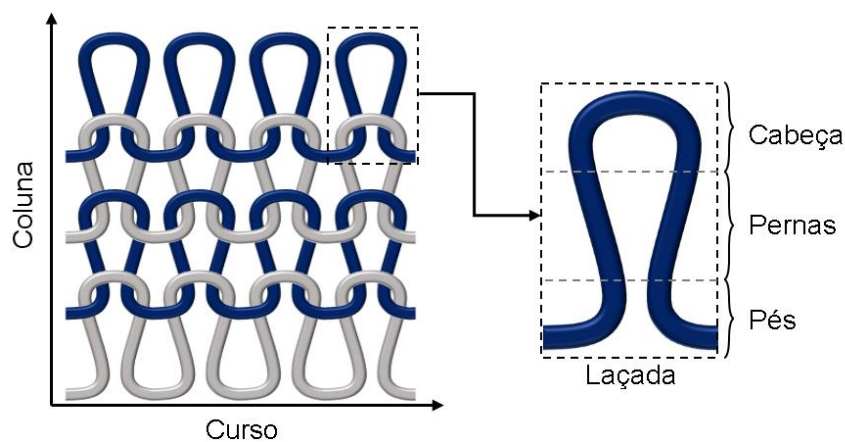


Fonte: SOUZA PEREIRA, 2009.b.

### 2.2.2.2 Tecido de Malha

O tecido de malha é composto por estruturas produzidas pelo entrelaçamento de fios utilizando técnicas de formação de laçadas, onde: a carreira ou curso é a sucessão de laçadas consecutivas na horizontal e a coluna é a sucessão de laçadas consecutivas no sentido vertical. A laçada é o elemento fundamental deste tipo de tecido e, constitui-se de uma cabeça, duas pernas e dois pés, como ilustra a Figura 38.

Figura 38 - Estrutura básica do tecido de malha.



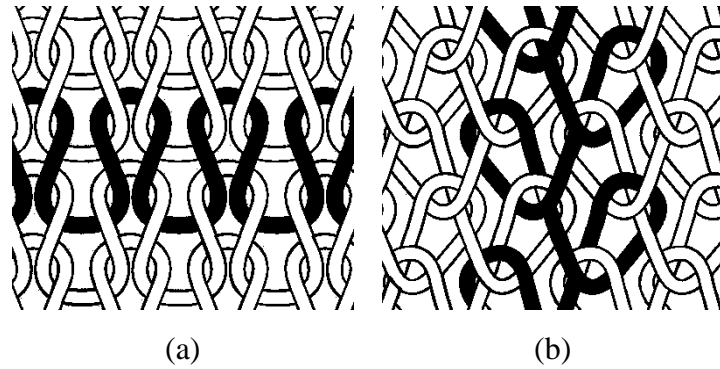
**Fonte:** Autoria própria.

Essas laçadas em formato senoidal amparam-se entre si de modo a permitir o livre movimento de umas sobre as outras quando submetidas a uma tensão, seja no sentido longitudinal ou transversal do tecido. Essa capacidade de modelagem ou flexibilidade é uma propriedade característica dos artigos de malha, e implicam numa melhor adaptabilidade e conforto as mais complexas formas do corpo humano. Além disso, os tecidos de malha possuem fabricação mais simples que os tecidos planos, maior variedade de contexturas e maior conforto fisiológico térmico devido ao seu alto índice de porosidade (GUERRA, 2016).

O comprimento da laçada é um fator importante, pois relaciona o quão próximo os pés e cabeças estão das unidades que compõem o tecido, estando este parâmetro diretamente ligado ao índice de porosidade que a malha apresenta, além de definir a rigidez física da estrutura confeccionada (KUASNE, 2008). Esse comprimento é determinado no processo de fabricação da malha, sendo seu limite relacionado ao esforço máximo que o fio pode suportar no momento da confecção, isto é, quanto menor a laçada, maior a tensão aplicada ao fio (GUERRA, 2016).

Existem duas técnicas fundamentais para confecção de tecidos de malhas por: trama e por urdume (teia), cada uma possui características próprias e sua aparência básica está representada na Figura 39.

Figura 39- Tecido de Malha por: (a) Trama; (b) Urdume (Teia).

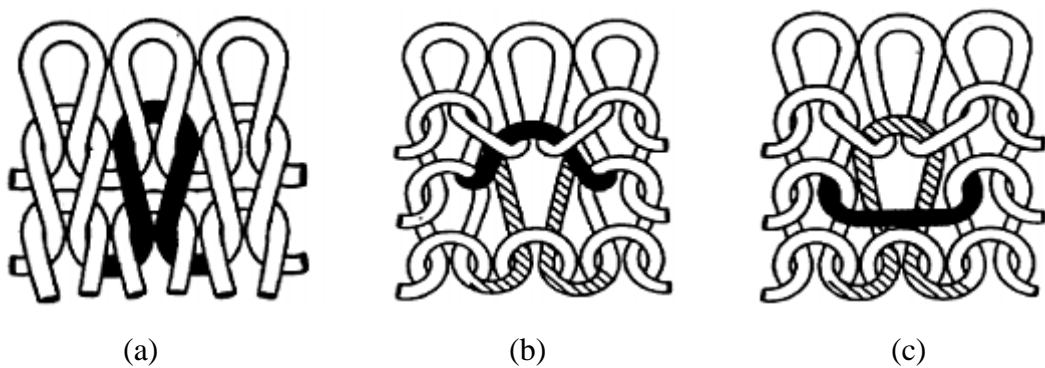


**Fonte:** Adaptado de VEBLEN, 2008.

As malhas por trama são tecidos que obtidos por meio de um ou mais fios de trama que são transformados em laçadas horizontais, podendo ser desmalhado (desfia), enquanto as malhas por urdume são produzidas a partir de um ou mais conjuntos de fios dispostos lado a lado em laçadas verticais, sendo indesmaltável (não desfia) (SILVA, 2012).

De acordo com Macedo (2016), em tecidos de malha, para desenvolver diversos tipos de estruturas, são feitas infinitas combinações com os três tipos de laçadas existentes: laçada regular (meia malha); laçada de retenção (*fang*) e a laçada flutuante (não-trabalha), como ilustra a Figura 40.

Figura 40 - Tipos de laçadas: (a) Meia Malha (Jersey); (b) Fang; (c) Flutuante.



**Fonte:** Adaptado de MACEDO, 2016.



Entre as principais estruturas de malha produzidas destacam-se: a Meia Malha (Jersey) e o Piquet. A estrutura Jersey (Figura 40-a) possui todas as laçadas desenhadas apenas de um lado do tecido (todos os pontos são simples), sendo um tecido desbalanceado e com tendência a enrolar nas bordas, esticando aproximadamente em ambas direções (comprimento e largura). A contextura Piquet é produzida através da combinação de malha com *fang*, vindo no lado direito do tecido as pernas da malha com deslocamento de carreira, e no lado avesso o aspecto de losangos em relevo (MACEDO, 2016).

Dessa forma, o tamanho dos poros, a espessura, o volume e a densidade influenciam, por exemplo, no isolamento térmico e absorção de líquidos e gases. Ao mesmo tempo, a orientação das fibras e fios apresenta uma anisotropia planar intrínseca de propriedades gerais (CAVALCANTE, 2014). De acordo com Loss (2012), para manter o equilíbrio hidrodinâmico os materiais têxteis estão em constante troca de moléculas de água com o ar, alterando as propriedades eletromagnéticas e dimensionais do material. É importante ressaltar que todos esses parâmetros influenciam de algum modo na performance dos circuitos planares de micro-ondas, sendo difícil o controle dessas características em aplicações reais de tecidos.

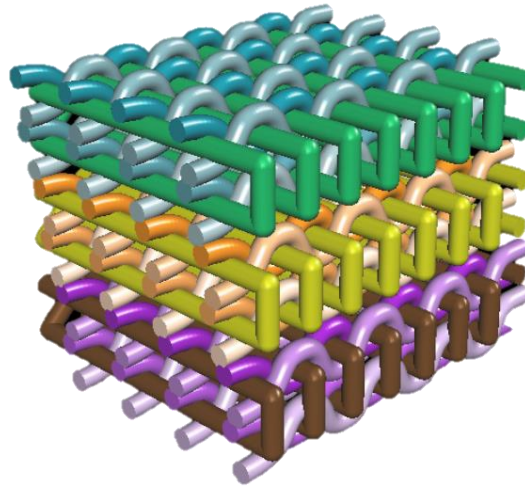
### 2.2.2.3 Estruturas 3D

Segundo Araújo et al. (2001), as estruturas tridimensionais (3D) foram criadas, para suportar desgastes mecânicos multidireccionais e responder às condições mais exigentes de acordo com a aplicação. Estes tipos de materiais são confeccionados utilizando os mais diversos tipos de estruturas tais como tecidos, malhas, não-tecidos e entrançados possuindo características diferentes das estruturas convencionais. Nesse contexto, o interesse pelo desenvolvimento de estruturas 3D é crescente, sendo resultado direto das infinitas capacidades de aplicações desse material, sobretudo nas áreas automotiva, médica e aeroespacial. De acordo com Ivan de Medeiros (2013) as estruturas tridimensionais podem ser classificadas em: estrutura multicamada, estrutura sanduiche e estrutura com formas.

Os tecidos multicamada são aqueles constituídos por vários fios, formando múltiplas camadas, como ilustra a Figura 41. Neste tipo de tecido, as camadas são interligadas por meio do entrelaçamento dos fios de urdume com os fios de trama das camadas adjacentes no tecido, ou através do entrelaçamento dos fios constantes entre as camadas da parte superior e inferior da estrutura (IVAN DE MEDEIROS, 2013). Segundo Fanguero (2002), estes fios de conexão também podem ser entrelaçados verticalmente, formando um tecido ortogonal. As estruturas

multicamadas podem ser densas, possuir espessura fina ou ainda ter espaçamento entre as múltiplas camadas constituintes.

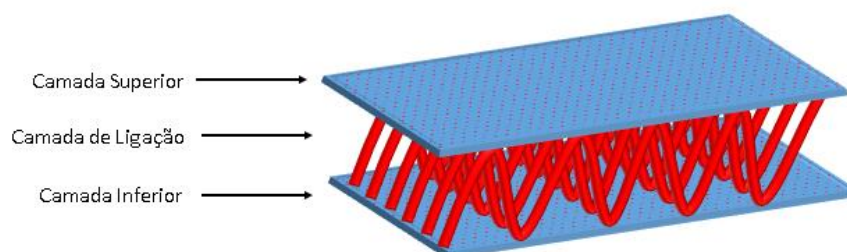
Figura 41 - Estrutura Multicamadas.



**Fonte:** Adaptado de SCOTWEAVE, 2016.

Os tecidos classificados como sanduíche, possuem uma estrutura resultante formada por duas camadas (inferior e superior) interligadas por fios que são entrelaçados perpendicularmente, conforme ilustra a Figura 42. O método de fabricação destas estruturas é muito versátil, permitindo alterações tanto na densidade de fios de ligação, bem como na estrutura (IVAN DE MEDEIROS, 2013). Os fios que estão presentes na camada de ligação, unindo as duas camadas superior e inferior, são os responsáveis pela característica tridimensional da estrutura e impedem a delaminação.

Figura 42 - Estrutura Sanduíche.



**Fonte:** Autoria Própria.

Os tecidos com forma possuem propriedades de memória de forma e apresentam efeitos tridimensionais na sua forma superficial, como ilustra a Figura 43. De acordo com Ivan de

Medeiros (2013), esses tecidos são compostos por novos tipos de fibras tecnológicas e acabamentos superficiais, possuindo capacidade de memorizar uma forma, na qual posteriormente deformada, quando em contato com temperatura, luz, ou outro fenômeno físico, retorna à forma previamente memorizada.

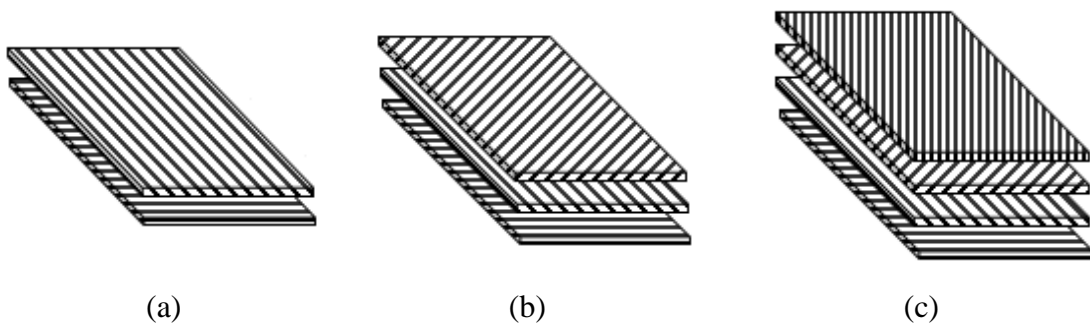
Figura 43 - Tecido com memória de forma



Fonte: PINTEREST, 2016.

Nos tecidos 3D as fibras podem ser sobrepostas com diversas orientações (biaxial, triaxial e quadriaxial), como apresenta a Figura 44, e combinações (vidro, carbono, kevlar e híbridos), visando obter uma sinergia que resulte em propriedades superiores às propriedades individuais das estruturas de acordo com a aplicação (LIMA FILHO, 2009).

Figura 44 - Orientações das camadas dos tecidos: (a) Biaxial; (b) Triaxial; (c) Quadriaxial



Fonte: Autoria Própria.

### 2.2.3 Propriedades

Nesta seção serão listados os principais parâmetros que compõem um tecido de malha e, que foram utilizados na etapa de caracterização física das amostras estudadas neste trabalho.

### 2.2.3.1 Título

O título é uma propriedade que indica a densidade linear do fio. De acordo com o Sistema Internacional (SI) é utilizado o sistema direto TEX, que representa quantos gramas de fibra existem em 1000 m de fio (ABTN; SEBRAE, 2012). Para o sistema direto de titulação a equação adotada é:

$$T = \frac{K \times M}{C} \quad (57)$$

Onde T é o título do fio, K é o valor constante resultante da divisão do comprimento fixo pela base massa (no caso do TEX, K=1000 m/g), M é massa do fio (gramas) e C é comprimento do fio (metros). Nesse sistema quanto maior o valor do título maior será o diâmetro do fio, considerando um mesmo material e processo de fiação.

A titulação indireta (Ne), geralmente utilizada no sistema inglês, é caracterizada pela relação inversa entre uma massa constante (em libras) e comprimento variável (em hank). Utilizando equivalências entre os sistemas de titulação, define-se a Equação 74 para o cálculo do título indireto (ASTM, 2008).

$$Ne = \frac{590}{TEX} \quad (58)$$

Onde 590 é a constante de proporcionalidade entre as unidades, considerando a massa em gramas e o comprimento em metros. Neste sistema o título é inversamente proporcional ao diâmetro, portanto, quanto mais espesso o fio, menor o título, admitindo um mesmo material e processo de fiação.

### 2.2.3.2 Gramatura

A gramatura é a propriedade que designa a massa por unidade de área do tecido (densidade superficial), sendo um dado muito útil para controlar a qualidade do material. Essa

propriedade está relacionada com o título do fio, o tipo de fibra, estrutura do tecido e comprimento da laçada (ASTM, 2002). Assim, considerando um tecido de iguais estruturas, tamanho da laçada e material, quanto maior o título direto do seu fio, maior será a sua gramatura, e neste caso, a presença de espaços vazios será menor.

#### 2.2.3.3 Estabilidade Dimensional

A estabilidade dimensional está relacionada à resistência a alterações (encolhimento ou alongamento) nas dimensões dos tecidos (largura e comprimento) quando submetidos a condições ambientais controladas. Segundo Guerra (2016), esse parâmetro qualitativo define a capacidade do tecido em manter suas dimensões após o processo de lavagem com agentes químicos e físicos que o agredem, podendo, ou não, causar o encolhimento ou alongamento do tecido. Segundo a ASTM (2015), são considerados apenas limites mínimos de 5% de redução ou alongamento dos tecidos visto que acima desse valor o tecido é classificado com baixa estabilidade dimensional.

#### 2.2.3.4 Resistência à Tração

A resistência à tração (ou resistência ao rasgo) é a relação estabelecida entre força de tensão aplicada as extremidades do tecido e o alongamento sofrido por este até seu rompimento total. Ao ser submetido esse tipo de esforço físico, o tecido expande naturalmente, estando seu o nível de deformação atribuído diretamente a elasticidade do tecido, que por sua vez, é consequência, principalmente, de fatores como: tipo de estrutura e fibra compõe os fios (ASTM, 2013).

### 2.3 ANTENAS TÊXTEIS

A miniaturização de sensores e circuitos eletrônicos, assim como o desenvolvimento de sistemas versáteis de comunicação sem fio, tem impulsionado a pesquisa e aplicações de dispositivos eletrônicos vestíveis na última década, em especial as antenas têxteis (KIOURT e VOAKIS, 2016; SALVADO, LOSS e PINHO, 2012). A tecnologia vestível é de grande

interesse para uma ampla área de aplicações pois proporciona funcionalidades de sensoriamento e comunicação de maneira discreta. Uma antena vestível pretende ser uma parte da roupa usada para fins de comunicação, que inclui rastreamento e navegação, computação móvel e segurança pública. (GUPTA, SANKARALINGAM e DHAR, 2010). No campo civil, esses dispositivos de comunicação seriam utilizados com intuito de troca de informações e interação social, como também em atividades relacionadas ao desporto para controlar os sinais vitais dos atletas (LOSS, 2012). Em aplicações militares, são capazes de reduzir os sistemas de monitoramento e a carga sobre os soldados, facilitando sua movimentação (LIM, et al., 2014). Além disso, existem ainda aplicações relacionadas área médica, em que os vestuários teriam a habilidade de monitorar os sinais biológicos e fornecer informações contínuas sobre o estado de saúde de um indivíduo (KISHK, 2013; KOSKI et al., 2014; LIN e ITO, 2014).

Nesse contexto, as antenas têxteis (também chamada de antenas vestíveis) desempenham uma importante função de fazer com que haja a transferência de dados entre os sistemas de comunicação vestíveis. Estas antenas geralmente são desenvolvidas na configuração de microfita (ver seção 2.1.2), tendo em vista que essa estrutura proporciona adaptabilidade a formas complexas, baixo perfil e facilidade de integração em roupas e acessórios (GUPTA, SANKARALINGAM e DHAR, 2010). Para proporcionar flexibilidade ao dispositivo e o conforto aos seus usuários, os elementos (condutores e/ou dielétricos) que compõem a antena são constituídos de material têxtil (ver seção 2.3.1).

### **2.3.1 Materiais Aplicados em Antenas Têxteis**

Neste tópico serão abordados os principais materiais têxteis (condutores e dielétricos) utilizados na fabricação de antenas têxteis, mostrando os métodos de caracterização existentes e de que forma as características desses materiais influenciam nos parâmetros de funcionamento das antenas.

#### **2.3.1.1 Materiais Têxteis Dielétricos**

Para antenas flexíveis vestíveis, é interessante a utilização de substratos têxteis, porque antenas têxteis podem ser facilmente integradas às roupas. Materiais têxteis possuem baixa

constante dielétrica (geralmente em torno de 2), devido aos altos índices de porosidade do material, o que implica na redução de perdas por correntes superficiais e aumento da largura de banda (GUPTA, SANKARALINGAM e DHAR, 2010). A Tabela 3 apresenta os principais materiais têxteis dielétricos utilizados na literatura.

Tabela 3 – Materiais dielétricos utilizados em antenas têxteis.

| Material Dielétrico                    | Frequência (GHz) | $\epsilon_r$ | $\text{tang } \delta$ | Referência            |
|--|------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|
| Jeans                                  | 2,4 e 5,0        | 1,80         | 0,070                 | TSOLIS, 2014.         |
|  | 14 – 40          | 1,8 – 2,0    | 0,014                 |                       |
| Espuma de Poliestireno                 | 2,4              | 1,02         | 0,00009               |                       |
| Feltro                                 | 2,4              | 1,36         | 0,016                 |                       |
| Lã                                     | 2,4              | 1,20         | 0,004                 |                       |
| Borracha Neoprene                      | 2,4              | 5,20         | 0,025                 |                       |
| Seda                                   | 2,4              | 1,20         | 0,054                 |                       |
| Algodão                                | 2,4              | 1,54         | 0,058                 |                       |
| Couro (diferentes tipos)               | 2,4              | 1,8 – 2,4    | 0,049 – 0,071         |                       |
| Poliéster                              | 2,4              | 1,44         | 0,010                 |                       |
| Poliéster-Algodão                      | 2,4              | 1,48         | 0,020                 |                       |
| Cordura®                               | 2,6              | 1,90         | 0,0098                | SALVADO et al., 2012. |
| Quartzel®                              | 2,6              | 1,95         | 0,0004                |                       |
| Cordura/Lycra®                         | 2,6              | 1,50         | 0,0093                |                       |
| Algodão/Linho                          | 2,4              | 1,70         | 0,0200                | HETLEER et al., 2010. |
| Algodão/Poliamida                      | 2,4              | 2,00         | 0,0200                |                       |
| Espuma Poliuretano (PU)                | 2,4              | 1,15         | 0,000                 |                       |
| Lã de Tereftalato de Polietileno (PET) | 2,4              | 1,25         | 0,001                 |                       |

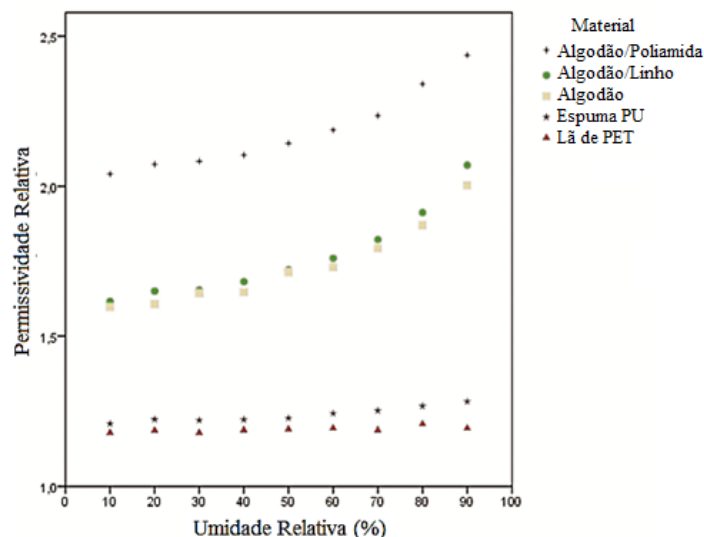
Fonte: Autoria Própria.

A escolha do material do substrato é muito importante pois ele está diretamente em contato com as partes condutoras, devendo proporcionar igual resistência a esforços externos, bem como baixa deformação, devendo ser selecionado e posicionado de acordo com uma

aplicação específica (VIRKKI, et al., 2015). Os principais fatores que podem alterar as propriedades dos substratos têxteis são: a umidade relativa do ar e a espessura do substrato (ver seção 2.1.2.3).

Os materiais têxteis sempre tendem a estabelecer um equilíbrio hidrodinâmico, com a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar, por meio da constante troca de moléculas de água com o ar. Segundo Loss (2012), a quantidade de água absorvida (ou teor de umidade) até o equilíbrio ser atingido varia de acordo com a origem, o tipo de estrutura molecular e o tipo de componentes químicos que formam as fibras do material têxtil. As variações no teor de umidade modificam as propriedades eletromagnéticas e dimensionais do material têxtil. Em seu trabalho, Hettler et al. (2010), encontrou uma equação que relaciona a permissividade elétrica relativa à umidade relativa para diferentes substratos têxteis, como ilustra a Figura 48.

Figura 45 - Relação entre a permissividade relativa e a umidade relativa.



Fonte: Adaptado de HETLEER, et al., 2010.

Como a permissividade do ar presente nos poros do tecido é igual a 1, ao serem preenchidos pela água, que possui  $\epsilon_r = 78$  (à 2,45 GHz e 25°C), a constante dielétrica da água prevalece sob a do material têxtil causando o aumento da constante dielétrica e das perdas no dielétrico, e reduzindo, conseqüentemente a largura de banda e a frequência de ressonância da antena (LOSS, 2012). Além disso, a absorção de água pelo tecido pode provocar alterações dimensionais (encolhimento ou aumento diâmetro das fibras), causando instabilidade geométrica e mecânica (diminuição da resistência) das antenas.



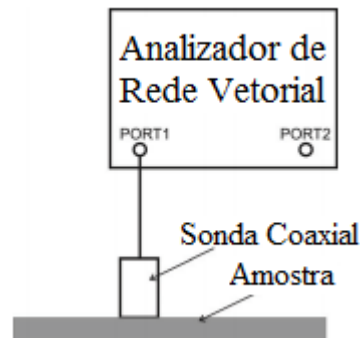
### 2.3.1.2 Métodos de Caracterização dos Substratos Têxteis

A permissividade elétrica e a tangente de perdas são parâmetros muito importantes do substrato de uma antena (ver seção 2.1.1.8). A partir de medições elétricas precisas destas propriedades os cientistas e engenheiros tem acesso a informações fundamentais para projetar antenas mais eficazes de acordo com a aplicação, e melhorando a fabricação o controle de qualidade. Dessa forma, é oferecida pela indústria uma variedade de instrumentos, acessórios e softwares para medira as propriedades elétricas e magnéticas dos materiais, tais como: analisadores de redes, medidores de LCR (Indutância, Capacitância e Resistência), e analisadores de impedância que variam de acordo com as amostras e frequência (CAVALCANTE, 2014). Segundo, Kassem; Lunet e Vigneras (2010), para selecionar um método de caracterização adequado, alguns parâmetros devem ser considerados, como: a faixa de frequência de operação de acordo com a aplicação do material, as propriedades físicas do material de interesse, a forma e natureza das amostras disponíveis (placa ou filmes finos, líquidos ou sólidos, etc).

Nesse contexto, existem diversos métodos para caracterização eletromagnética de materiais dielétricos (linha de transmissão/reflexão com sonda coaxial ou guia de onda, espaço livre, cavidade ressonante, placas paralelas, etc.), onde para cada um, uma amostra deve ser preparada de acordo com as especificações dos equipamentos que serão utilizados (DUARTE, 2013). Na interpretação dos dados medidos, há várias modelagens matemáticas para aquisição aproximada da permissividade de acordo com os parâmetros de espalhamento (ver seção 2.1.1.6), sendo o método de *Nicholson-Ross-Werr* o mais utilizado (LEŚNIKOWSKI, 2012).

No método da linha de transmissão/reflexão com sonda coaxial a permissividade relativa do material é estimada através do parâmetro da perda de retorno (ver seção 2.1.1.6). A amostra é posicionada a baixo da sonda coaxial que, por sua vez é ligada através de um cabo até um Analisador de Rede Vetorial (ARV), como ilustra a Figura 46. De acordo com Leśnikowski (2012), esse método é mais específico para amostras líquidas e semissólidas, entretanto, amostras têxteis podem ser enroladas em torno do condutor. O método da sonda coaxial é menos preciso quando comparado a outros, sendo necessário um tempo para calibração do equipamento, antes de se iniciar às medições de permissividade dos materiais (CAVALCANTE, 2014).

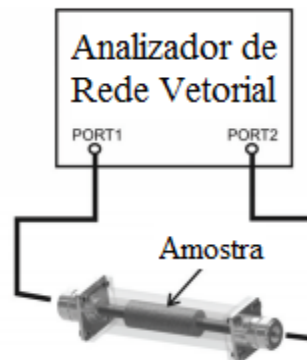
Figura 46 - Método da linha de transmissão/reflexão com sonda coaxial.



**Fonte:** Adaptado de LEŚNIKOWSKI, 2012.

No método da linha de transmissão/reflexão com o guia de ondas, a amostra é inserida em um guia de onda de formato retangular ou coaxial, sendo utilizado para caracterização de amostras sólidas que são preparadas segundo as especificações dimensionais do guia a ser usado. Após posicionar a amostra no interior do guia de onda, este é ligado ao ARV por meio de cabos, como mostra a Figura 47, e a permissividade relativa do material é estimada através dos parâmetros da matriz de espalhamento.

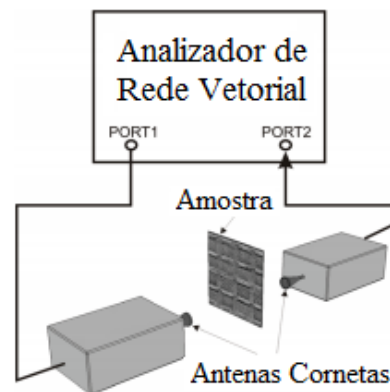
Figura 47 - Método da linha de transmissão/reflexão com guia de ondas.



**Fonte:** Adaptado de LEŚNIKOWSKI, 2012.

O método do espaço livre, consiste na utilização de uma amostra de material posicionada entre duas antenas do tipo corneta retangular, que, por sua vez são conectadas um ARV, como apresenta a Figura 48. A permissividade elétrica do material é determinada a partir da aferição do coeficiente de transmissão do sistema. Esse método é aplicado para amostras sólidas e normalmente esse método é utilizado para medições em altas frequências (CAVALCANTE, 2012). Uma calibração prévia do equipamento é necessária para garantir que as cornetas estejam alinhadas e a precisão do método.

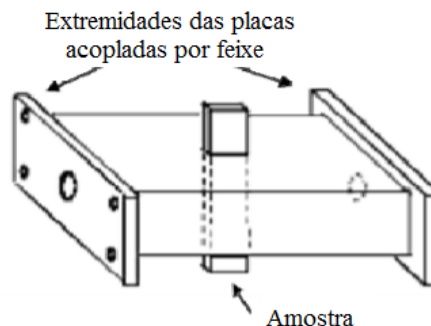
Figura 48 - Método do Espaço Livre.



**Fonte:** Adaptado de LEŚNIKOWSKI, 2012.

Os métodos de medições de ressonância possuem maior precisão para aquisição dos parâmetros de permissividade elétrica e permeabilidade magnética dos materiais. Segundo Cavalcante (2014), eles são amplamente usados em decorrência da sua simplicidade, processamento fácil de dados, precisão e capacidade de obter medições em elevadas temperaturas. Existem diversas técnicas de ressonância empregadas na caracterização de materiais dielétricos (ROY, BHATTERCHYA e CHOUDHURY, 2013; DECLERQ e ROGIER, 2009), sendo o método da cavidade ressonante, ilustrado na Figura 49, o mais popular e adequado para materiais que detém média e baixa perda (KASSEM, LUNET e VIGNERAS, 2010).

Figura 49 - Método da cavidade ressonante.

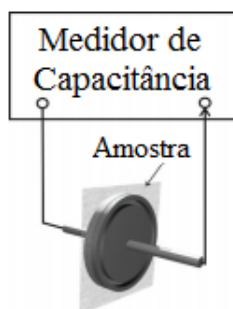


**Fonte:** Adaptado de KASSEM, LUNET e VIGNERAS, 2010.

No método das placas paralelas, a amostra do material dielétrico é inserida entre duas placas condutoras paralelas, semelhante a um capacitor, como mostra a Figura 50. A

permissividade é então calculada a partir da capacitância gerada entre as placas, e aferida a partir de um medidor de capacitância. Esse método é utilizado para amostras sólidas em baixas frequências (LEŚNIKOWSKI, 2012).

Figura 50 - Método das placas paralelas.



**Fonte:** Adaptado de LEŚNIKOWSKI, 2012.

### 2.3.1.3 Materiais Têxteis Condutores

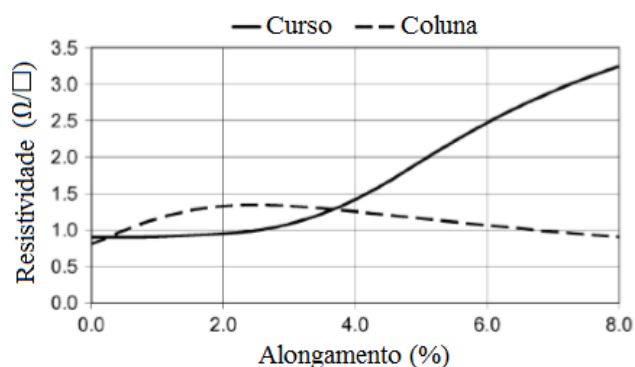
Em geral, os materiais têxteis convencionais possuem características isolantes. No entanto, a partir da combinação de fibras têxteis e fios condutores, como também através de recobrimentos metálicos de filamentos e tecidos, é possível se obter materiais que possuem alta condutividade elétrica. Os tecidos, as malhas e não-tecidos condutores são materiais têxteis planares, e por isso as suas propriedades elétricas são caracterizadas pela resistividade elétrica superficial (LOSS, 2012).

A resistividade elétrica superficial é uma propriedade intrínseca do material, podendo ser expressa através da razão entre a tensão por unidade de comprimento e a corrente por unidade de largura. Segundo Loss (2012), este parâmetro geralmente é cedido pelo fabricante do material condutor, contudo existem diversos métodos de obtenção deste parâmetro. Diversos fatores podem alterar a resistividade superficial de um material, tais como, deformação mecânica, proporção de fios condutores num tecido (quanto maior a presença de condutores, menor a resistividade) e o teor de umidade (a presença de umidade nas fibras têxteis ocasiona a diminuição da resistividade).

A conformidade proporcionada pela elasticidade dos tecidos é uma propriedade desejável para as antenas têxteis, contudo, se a deformação muito grande pode diminuir a precisão geométrica da antena alterando seus parâmetros de funcionamento. Nos tecidos de

malha, a resistência elétrica varia de acordo com a direção da deformação (longitudinal e transversal), devido ao aumento dos pontos de contato e do percurso elétrico. A Figura 51 mostra a relação entre a deformação no sentido da coluna e do curso (ver seção 2.2.2.2), e a resistividade elétrica.

Figura 51 - Variação da resistividade elétrica superficial de uma malha devido ao alongamento.



Fonte: Adaptado de LOCHER et al., 2006, apud LOSS, 2012.

Os materiais condutores são selecionados através de características como: baixa resistividade superficial ( $< 0,05 \Omega/\square$ ) com o intuito de minimizar as perdas por correntes superficiais; flexibilidade para permitir a fácil integração às roupas e movimentos do usuário; baixa elasticidade, já que alterações nas dimensões alteram as propriedades elétricas do material; durabilidade para suportar e manter seus parâmetros elétricos praticamente inalterados até em ambientes extremos; e homogeneidade através do material com o intuito de permitir uma distribuição uniforme de corrente e adesão segura do substrato (HAANGENSON et al., 2015). A Tabela 4 apresenta os principais tipos de materiais condutores utilizados na fabricação de antenas têxteis e suas respectivas formas de fixação no substrato.

Tabela 4 - Principais materiais condutores utilizados em antenas têxteis.

| Material Condutor                         | Resistividade          | Espessura (mm) | Fixação no Substrato | Referência              |
|---|------------------------|----------------|----------------------|-------------------------|
| Tecido Rip-stop revestido de Níquel-Prata | $0,050 \Omega/\square$ | 0,12           | Adesivo termocolante | HOLLAND, et al., 2013   |
| Tecido tafetá revestido de cobre          | $0,050 \Omega/\square$ | 0,08           | Adesivo spray        | HAANGENSON et al., 2015 |

| Material Condutor   | Resistividade                       | Espessura (mm)   | Fixação no Substrato | Referência                   |
|---|-------------------------------------|------------------|----------------------|------------------------------|
| Tecido <i>Schildex Nora Dell</i> – CR revestido de níquel-cobre-prata | $< 0,009 \Omega/\square$            | 0,13             | Adesivo spray        |                              |
| Fio de fibra condutiva cobre-prata                                    | $1,9 \Omega/\text{m}$               | 0,12             | Bordado              | KIOURT, LEE e VOLASKIS, 2016 |
| Tinta condutiva PTF a base de prata                                   | $1,250 \text{ MS}/\text{m}$         | -                | Serigrafia           | VIRKKI et al., 2015          |
| Pasta condutiva de prata  | $0,625 \Omega.\text{mm}^2/\text{m}$ | -                | Serigrafia           | LOCHER e TRÖSTER, 2007       |
| Tecido condutivo <i>Zelt</i> <sup>®</sup>                             | $<0,1 \Omega$                       | Não especificada | Adesivo e costura    | HETLEER, et al., 2008        |
| Tecido condutivo <i>FlecTron</i> <sup>®</sup>                         | $0,050 \Omega/\square$              | 0,08             | Não especificado     | MORETTI et al., 2011         |

Fonte: Autoria Própria.

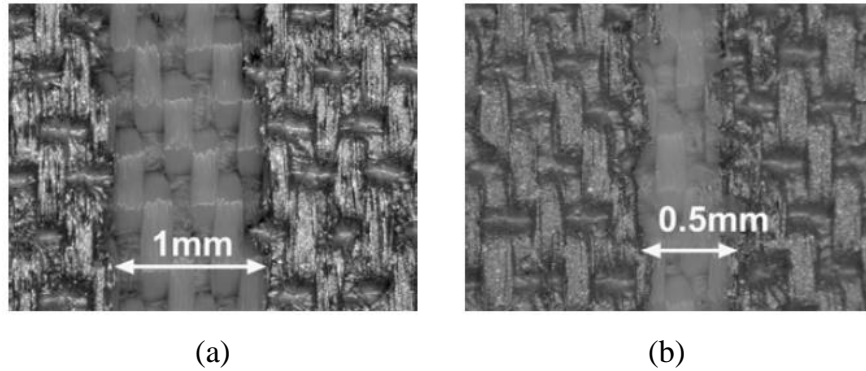
### 2.3.2 Artigos relacionados a Antenas Têxteis

Ao projetar uma antena têxtil é necessário considerar os possíveis erros ocasionados na etapa de fabricação e projeto. Além da seleção de materiais adequados de acordo com a aplicação, a forma de fixação entre os elementos condutores e dielétrico são de fundamental importância para obtenção de maior conformidade com os resultados obtidos na simulação e no projeto. Dessa forma, vários estudos foram realizados com o intuito de estimar a influência da modificação de alguns parâmetros que são utilizados na etapa de projeto e simulação e aumentar a acuracidade dos métodos de modelagem e implementação empregados.

Locher e Tröster (2007), analisaram a técnica de *screen-printed* (serigrafia) para confecção de linhas de transmissão, onde utilizaram como dielétrico um tecido de algodão e acrílico e, como material condutor, uma pasta de prata, como ilustra a Figura 52. Essa tecnologia preserva as características de flexibilidade e adaptabilidade do tecido, sendo geralmente utilizada em estruturas de uma única camada (LOCHER e TRÖSTER, 2007). Através desse trabalho, percebeu-se que a condutividade da linha muda de acordo com a quantidade de camadas depositadas da pasta. Isso implica numa impedância diferente e, conseqüentemente em permissividades elétricas distintas para os métodos utilizados na caracterização do substrato. Além disso, constatou-se que com a ocorrência de dobras a pintura racha e perde a condutividade no local. No entanto, se for posicionado de modo a evitar essas

dobras, a técnica fornece bons resultados em relação a precisão geométrica e desempenho elétrico.

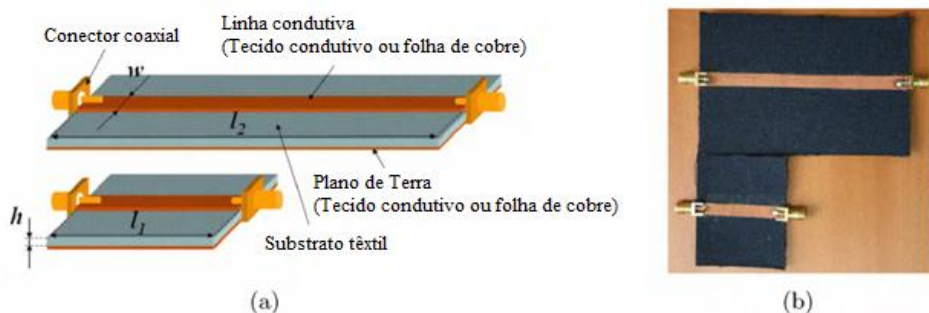
Figura 52 – Linhas de microfita com diferentes larguras feitas a partir de serigrafia: (a) 1 impressão; (b) 10 impressões.



Fonte: LOCHER e TRÖSTER, 2007.

Declerq e Rogier (2009), propuseram uma técnica dedicada a caracterização de substratos têxteis baseada nas medições de linhas de microfita com diferentes comprimentos, como apresenta a Figura 53, para determinar os parâmetros de permissividade elétrica e tangente de perdas a uma frequência de 2,45 GHz. Utilizou-se uma folha de cobre na caracterização, pois este material apresenta baixas perdas condutivas, assumindo, deste modo, que as atenuações causadas podem ser inteiramente atribuídas a perdas no dielétrico (DECLERQ e ROGIER, 2009). Devido a estrutura em camadas do substrato e ao padrão de tecelagem simétrica das camadas têxteis, um comportamento anisotrópico foi esperado. Após a caracterização a técnica foi validada através da construção e teste de uma antena.

Figura 53 - Linhas de microfita utilizadas. (a) Representação gráfica do dispositivo com linhas de teste. (b) Linhas de microfita com base em tecido Electron.



Fonte: Adaptado de DECLERQ e ROGIER, 2009.

Grilo e Correra (2013), construíram uma antena têxtil para aplicação na banda ISM (2,45 GHz). Com substrato Jeans e *patch* e plano de terra de tecido condutivo de cobre (PCPTF - *Pure Copper Polyester Taffeta Fabric*), os componentes foram fixados através de cola de bastão e, posteriormente, costurados para obter uma altura uniforme e evitar lacunas de ar entre as camadas de tecidos, ilustrado na Figura 54. Eles, constataram, via simulação computacional, que uma pequena variação de parâmetros do substrato têxtil (espessura, permissividade e tangente de perdas) e dimensões do *patch* ( $\pm 0,5$  mm), afetam a magnitude da perda de retorno e ocasionam deslocamento de frequência de ressonância da antena. Segundo Koski et al. (2013), a largura de banda de uma antena têxtil que possui *patch* de geometria regular é diretamente proporcional a espessura do substrato e inversamente proporcional a raiz quadrada da constante dielétrica deste.

Figura 54 - Antena têxtil com *patch* PCPTF e substrato Jeans: vista frontal (a) e posterior (b).

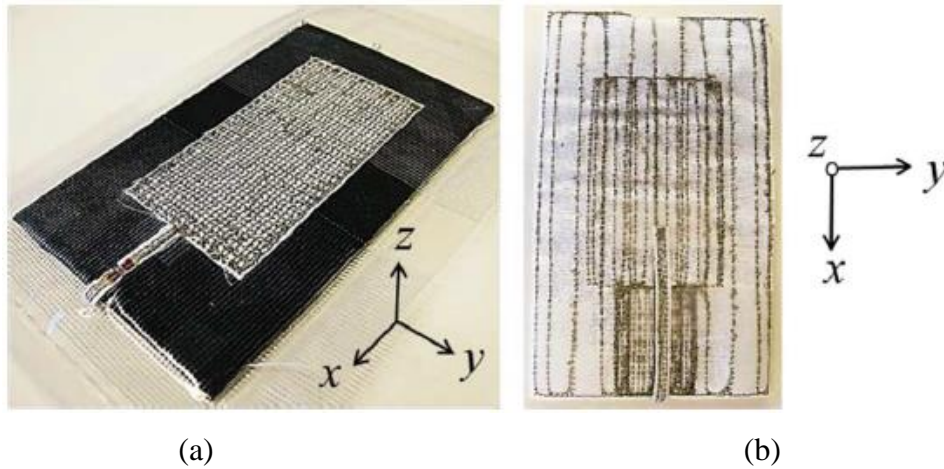


Fonte: GRILO e CORRERA, 2013.

Koski et al. (2014), investigaram os principais parâmetros para antenas têxteis que operam na faixa de frequência (860 - 960 MHz) RFID (*Radio-Frequency IDentification*) na banda UHF (*Ultra High Frequency*), utilizando como material condutor fio de prata para bordar o *patch* em um substrato de tecido emborrachado (EPDM - Etileno-Propileno-Dieno), como mostra a Figura 55. Várias formas de bordado foram implementadas onde se avaliou o comportamento de diagrama de radiação, densidade de corrente e alcance de leitura. Esse trabalho apresentou a existência de reatância na modelagem da impedância da lâmina (devido a não continuidade da estrutura condutora) que é responsável pela impedância de entrada da antena.



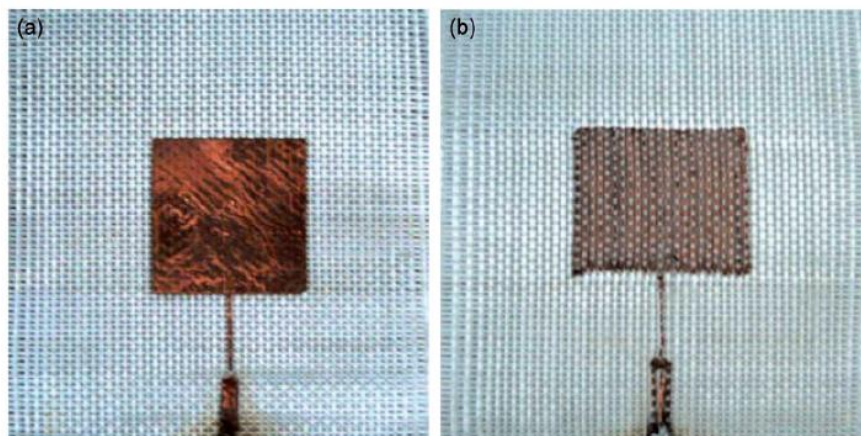
Figura 55 - Vista superior (a) e inferior (b) para antena têxtil com *patch* bordado com fio de prata em substrato de EPDM.



Fonte: KOSKI et al., 2014.

Yao e Qiu (2015), compararam duas antenas com substrato têxtil e diferentes partes condutoras: folha de cobre colada ao substrato e de fio condutor de cobre integrado na estrutura tridimensional do tecido, como ilustra a Figura 56. Ambas ressoaram abaixo de -10 dB em frequências entre 1,5 e 1,8 GHz, tendo a de folha de cobre apresentado menor perda de retorno e, maiores deslocamentos de frequência e ganho que a de fio de cobre, tomando como base uma antena ideal simulada. A principal razão para essa discrepância foi atribuída a baixa condutividade elétrica do *patch* bordado, que se deve a área de contato limitada aos pontos intercalados e a sobreposição dos fios, o que leva ao aumento de perdas ôhmicas e, conseqüentemente, baixo ganho (YAO e QIU, 2015).

Figura 56 –Duas amostras de antenas: (a) *Patch* de folha de cobre; (b) *Patch* de fio cobre



Fonte: YAO e QIU, 2015.

Haagenson et al. (2015), apresentam o projeto, simulação, fabricação e teste de uma antena têxtil para aplicações em trajes espaciais na frequência de 2,45 GHz. Eles projetaram e simularam as antenas através do *software* FEKO e posteriormente testaram vários tipos de tecidos (condutivos e dielétricos) e diversas técnicas de fabricação, onde constataram que o adesivo em spray foi o mais adequado para fazer a junção dos elementos pois não causa mudanças significativas na performance elétrica dos materiais nem afetava a sua flexibilidade. Para o *patch* e plano de terra foram utilizados tecidos condutivos, e para o substrato, tecidos de feltro e estabilizadores, todos com uma boa espessura para evitar que os espaços vazios existentes fossem preenchidos na etapa de aplicação do adesivo. As formas de alimentação também foram variadas, (cabo coaxial e linha de alta impedância) utilizando conector SMA (*SubMiniature version A*), como ilustra a Figura 57. As antenas fabricadas foram testadas sob três condições diferentes (fora do traje em ambiente laboratorial, acoplada no traje ao ar livre, e em câmara anecoica) e foi avaliado ainda o efeito que a curvatura dessa antena provocaria em seus parâmetros de operação. Foi constatado que, em geral, a performance das antenas, quando montadas no traje, decaíram devido a fatores severos como, a falta de precisão na fabricação, dobras e múltiplas reflexões do sinal.

Figura 57 - Antena têxtil para aplicação em trajes espaciais: (a) alimenta por cabo coaxial (b) alimentada por linha de alta impedância.



(a)



(b)

**Fonte:** HAAGENSON et al., 2015.

Kiourti, Lee e Volakis (2016), apresentam uma nova seleção de fibra elétrica e processo de fabricação de antenas têxteis e circuitos de alta precisão. Foi utilizado tecido a base de PDSM (Poli dimetil-siloxano) como substrato e, para o *patch*, foi usado fio condutor de 7 filamentos banhado a cobre e prata (diâmetro de 0,12 mm e resistividade de 1,9  $\Omega$ /m), que permitiu baixa

tensão de bordado, elevada flexibilidade e juntamente com a técnica de confecção utilizada pôde levar a precisão geométrica de 0,1 mm. O processo é feito através de um Desenho Assistido por Computador (CAD), onde o arquivo é exportado para um *software* compatível que possui ferramentas para bordado e é convertido em padrões de costura. Um processo de bordado automatizado foi aplicado por meio de uma máquina de costura programável. As antenas produzidas foram comparadas com as desenvolvidas a partir de outras técnicas de bordado menos precisas, como ilustra a Figura 58. Uma antena espiral foi fabricada e testada para uma faixa de frequência de 1 a 5 GHz. Os dados medidos mostraram grande concordância de valores com os simulados (onde utilizou-se PEC – *Perfect Electrical Conductor*) até uma frequência de 3 GHz. Para frequências mais elevadas houve discrepância maior que pode ser atribuída as perdas devido a rugosidade e imperfeições na metalização da superfície do fio (KIOURT, LEE e VOLAKIS, 2016).

Figura 58 - Comparação entre as técnicas de fabricação de antenas têxteis utilizando fio condutor bordado.



Fonte: Adaptado de KIOURT, LEE e VOLAKIS, 2016.

A Tabela 5 mostra as principais aplicações e tipos de matérias utilizados na fabricação de antenas têxteis e suas respectivas performances.

Tabela 5 - Comparação de materiais têxteis utilizados no projeto de antenas vestíveis.

| Aplicação                           | Material Dielétrico |                |              |               | Material Condutor | Performance |
|-------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|---------------|-------------------|-------------|
|                                     | Material            | Espessura (mm) | $\epsilon_r$ | $\tan \delta$ |                   |             |
| GSM (900 MHz) e Bluetooth (2,4 GHz) | Não especificado    | 0,236          | 3,29         | 0,0004        | -                 | Aceitável   |

| Aplicação                        | Material Dielétrico               |                |              |               | Material Condutor                                | Performance        |
|----------------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------|---------------|--|--------------------|
|                                  | Material                          | Espessura (mm) | $\epsilon_r$ | $\tan \delta$ |  |                    |
| GPS (1,5 GHz)                    | Cordura®                          | 0,500          | 1,10 – 1,70  | -             | Fita de cobre                                    | Boa                |
| WLAN (2,4 GHz)                   | Tecido de Lã                      | 3,000          | 1,04         | -             | Tecido de malha de cobre                         | Aceitável          |
| ISM (2,4 GHz) e GPS (1,5 GHz)    | Tecido de Lã                      | 2,560          | 1,25         | -             | Tecido condutivo <i>Flectron</i>                 | Aceitável para Boa |
| ISM (900 MHz)                    | Espuma de poliuretano de proteção | 11,000         | 1,16         | 0,0100        | Tecido condutivo <i>Flectron</i>                 | Aceitável          |
| WLAN (2,4 GHz e 5,8 GHz)         | Feltro                            | 1,100          | 1,30         | 0,0200        | Tecido condutivo <i>Zelt</i>                     | Aceitável          |
| ISM (2,4 GHz)                    | Algodão/Poliéster                 | 2,808          | 1,60         | 0,0200        | Tecido condutivo <i>Flectron/Tinta Condutiva</i> | Aceitável          |
| Não especificada (2,0 – 2,4 GHz) | PDMS                              | -              | 3,00 – 1,30  | 0,0200        | Bordado de fibras condutivas                     | Boa                |
| Bluetooth (2,4 GHz)              | Tecido de poliamida espaçado      | 6,000          | 1,14         | -             | Tecido banhado com prata-cobre-níquel            | Boa                |
| Bluetooth (2,4 GHz)              | Tecido de Lã                      | 3,500          | 1,45         | 0,0200        | Tecido banhado com prata-cobre-níquel            | Boa                |

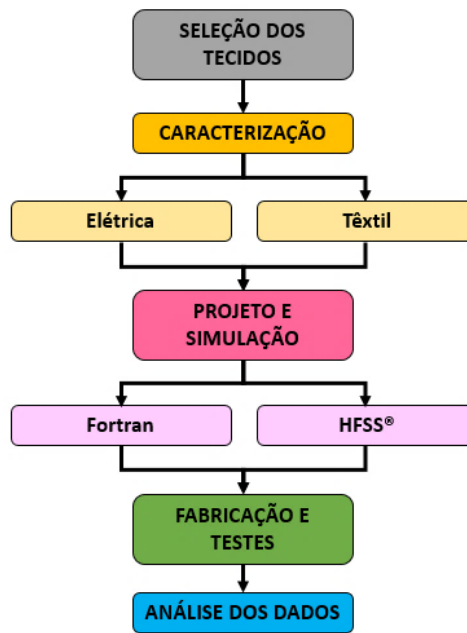
Fonte: Adaptado de SALVADO, et al., 2012.

De acordo com a Tabela 5, é possível notar que a maioria dos trabalhos desenvolvidos usam tecidos como o *Flectron* e o *Zelt*, que segundo Loss (2012), são os materiais têxteis condutivos mais conhecidos no mercado. A espessura dos substratos não ultrapassa os 11 mm, onde a maioria dos autores utilizam tamanhos inferiores aos 3 mm para uma melhor integração nas roupas (LOSS, 2012). Além disso, os substratos dielétricos mais utilizados possuem um valor de constante dielétrica entre 1,1 e 1,5, ressaltando a presença significativa de ar devido a estrutura porosa dos tecidos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão descritos os materiais e métodos empregados na realização deste trabalho desde a etapa de caracterização até a confecção e testes da antena têxtil. A Figura 59 ilustra de forma sucinta a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 59 - Fluxograma do processo metodológico utilizado.



Fonte: Autoria própria.

Na etapa inicial os tecidos, disponibilizados pelo Departamento de Engenharia Têxtil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), foram selecionados visando os melhores parâmetros para a aplicação em substratos de antenas microfita têxteis, desse modo, todos possuem característica dielétrica e baixo perfil para integração as roupas. Foram escolhidos seis tecidos de malha com diferentes estruturas e composições de fibras manufaturadas, como disposto na Tabela 6.

Tabela 6 - Tecidos de malha utilizados

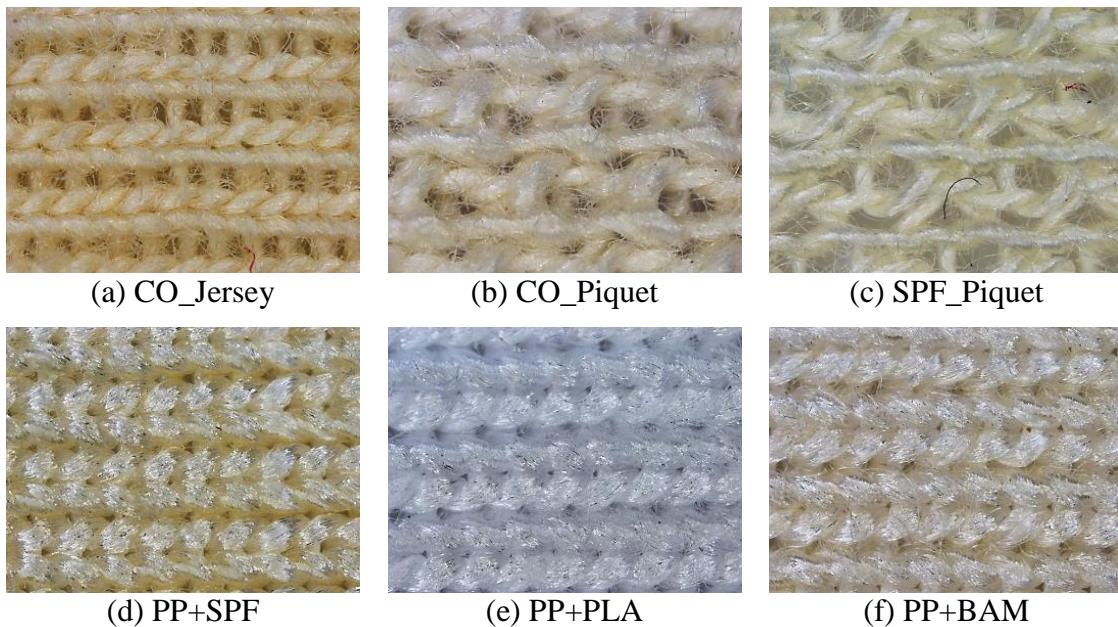
| COMPOSIÇÃO           | ESTRUTURA     | SIGLA      |
|----------------------|---------------|------------|
| 100% Algodão         | Jersey        | CO_Jersey  |
| 100% Algodão         | Piquê Simples | CO_Piquê   |
| 100% Soja            | Piquê Simples | SPF_Piquet |
| Polipropileno + Soja | Jersey        | PP + SPF   |

| COMPOSIÇÃO            | ESTRUTURA | SIGLA    |
|-----------------------|-----------|----------|
| Polipropileno + Milho | Jersey    | PP + PLA |
| Polipropileno + Bambu | Jersey    | PP + BAM |

**Fonte:** Autoria própria.

As imagens dispostas na Figura 60 foram capturadas utilizando um microscópio estereoscópico Nikon SMZ18 com aproximação de 3x, e mostra com clareza as estruturas das malharias utilizadas.

Figura 60 - Imagens das estruturas dos tecidos analisados com aproximação de 3x.



**Fonte:** Autoria própria.

A fase de caracterização dos tecidos de malha foi dividida em duas partes: caracterização elétrica, com o intuito de se obter os parâmetros de permissividade e tangente de perdas das amostras através de um ARV (Analisador de Rede Vetorial) e um kit de medição de impedância; e caracterização têxtil realizada de acordo com as normas técnicas apropriadas para obtenção de parâmetros como, gramatura, estabilidade dimensional, titulação e resistência a tração. Após essas etapas, os parâmetros elétricos e físicos obtidos são utilizados no projeto das antenas. Por meio de programa desenvolvido em linguagem Fortran, o modelo da linha de transmissão e método da cavidade, foram aplicados para calcular as dimensões das antenas de microfita. De posse desses valores, as antenas foram simuladas, para obter os principais parâmetros de operação da antena (diagrama de radiação, coeficiente de reflexão, densidade de corrente e ganho).

O melhor resultado simulado foi implementado com o tecido selecionado disposto numa estrutura de camadas sobrepostas de acordo com as dimensões projetadas. Em seguida, as antenas foram testadas através de um Analisador de Espectro, onde foram coletados dados que permitem a confecção da carta de Smith e coeficiente de reflexão. Por fim, os dados experimentais coletados foram comparados com os simulados e, os resultados analisados de acordo com a literatura especializada que embasam este trabalho.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO

Para uma melhor compreensão dos parâmetros têxteis visando a aplicação e ainda a aquisição dos parâmetros elétricos para projeto da antena, serão apresentados nas seções seguintes de forma detalhada os procedimentos adotados nas etapas de caracterização elétrica e física dos tecidos analisados.

#### 3.1.1 Medições Elétricas

As medições dos parâmetros elétricos foram realizadas através do método de transmissão/reflexão com sonda coaxial, utilizando um ARV da Rohde & Schwarz ZNB4 e um kit para medição de impedâncias da Aligent 85070E, apresentado na Figura 61, disponível no Laboratório de Microondas da UFRN. Neste método a permissividade dielétrica e a tangente de perdas são aferidas a partir do parâmetro do coeficiente de reflexão.

Figura 61 – ARV Rohde & Schwarz ZNB4 e kit Aligent 85070



**Fonte:** Autoria Própria.

Assim, após a calibração do equipamento, cada amostra foi disposta em várias camadas de tecido formando um substrato com altura (h) em torno de 1,5 cm, tamanho calculado de acordo com as especificações apresentadas por Aligent Technologies (2008), como mostra a Equação 75:

$$h = \frac{20}{\sqrt{|\epsilon'|}} \quad (59)$$

A constante dielétrica foi estimada tomando como base os valores apresentados na Tabela 3. Posteriormente, a sonda (probe 020 do kit 85070E) foi posicionada sob cada elemento, como mostra a Figura 65, e, foram efetuadas as medições no intervalo de 0,2 a 4,5 GHz com passo de 0,086. Quando a sonda está em contato com a amostra, os campos presentes em sua extremidade sofrem alterações, havendo desta forma, reflexão parcial do sinal enviado de acordo com o material analisado.

Figura 62 - Método da sonda coaxial utilizado.



**Fonte:** Autoria Própria.

Os dados de coeficiente de reflexão obtidos foram enviados a um computador, e através do *software* que vem incluso no kit 85070E, foi possível obter os valores de constante dielétrica, fator de perdas e tangente de perdas.

### 3.1.2 Medições Têxteis

Para compreender melhor a influência da estrutura e composição dos tecidos de malha nos parâmetros elétricos, e, visando a viabilidade e aplicações dessas antenas têxteis, foram



realizados ensaios de titulação, gramatura, estabilidade dimensional e resistência a tração. A obtenção das propriedades têxteis foi feita de acordo com as normas técnicas, respeitando a ISO 139 e utilizando os equipamentos disponíveis no Departamento de Engenharia Têxtil da UFRN.

As normas de caracterização têxteis são feitas para estimar a qualidade do fio e sua melhor aplicação para determinados tecidos. Os ensaios de titulação e gramatura foram feitos de acordo com as normas ASTM 3776 (2002) e 3887 (2008). No ensaio de titulação foram desmalhadas quatro amostras de fio de cada tecido com tamanhos de 100 cm cada. Em seguida, essas amostras foram pesadas numa balança analítica da Bel Mark M214ai, como ilustra a Figura 63, e através da média aritmética dos valores aferidos de massa foi possível calcular o título dos fios através do sistema direto (ver seção 2.2.3.1).

Figura 63 - Balança analítica Bel Mark M214ai.



**Fonte:** Autoria Própria.

Para o ensaio de gramatura foram preparadas, com o auxílio de um cortador de tecido circular MESDAN 175B de 100 cm<sup>2</sup> (Figura 64.a), três amostras de cada material e feita a pesagem numa balança analítica da Shimadzu AUY-220 (Figura 64.b).

Figura 64 - Equipamentos utilizados no ensaio de gramatura. (a) Cortador circular MESDAN 175B; (b) Balança analítica da Shimadzu AUY-220.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria.

Os testes de estabilidade dimensional foram realizados de acordo com a ASTM 6207 (2015), onde amostras quadradas (10 cm x10 cm) de cada tecido foram postas numa solução de sabão em pó (4 g/l) numa *washtester* MATHIS (Figura 65.a) durante 30 minutos a 60 °C. Após esse processo, as amostras foram para etapa de secagem numa estufa Nova Ética 220W a 36 °C por cerca de 4 horas (Figura 65.b).

Figura 65 - Equipamentos utilizados no ensaio de estabilidade dimensional: (a) *washtester* MATHIS; (b) Estufa Nova Ética



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, os tecidos foram fixados por meio de tachas de ferro numa superfície plana, e suas medidas, no sentido da coluna e do curso, foram aferidas por meio de uma régua com precisão milimétrica. A Figura 66 ilustra as etapas em processo para o ensaio de estabilidade dimensional.

Figura 66 - Ensaio de estabilidade dimensional.



**Fonte:** Autoria própria.

A medição da resistência à tração foi realizada de acordo com a norma ASTM 5034 (2013), onde amostras retangulares de tecido (5 cm x 10 cm) foram cortadas, cinco no sentido da coluna e cinco no sentido do curso. Os modelos foram presos nos mordedores do dinamômetro Tensolab 3 2512A da MESDAN, como ilustrado na Figura 67, e tracionados até a ruptura.

Figura 67 - Ensaio de resistência a tração (a) Antes da ruptura; (b) Após da ruptura.



(a)

(b)

**Fonte:** Autoria própria.

As medidas de espessura dos tecidos e dos fios que os compõem foram aferidas por meio de um paquímetro digital Z22855 da PowerFix, como ilustra a Figura 68, com o intuito de tornar o projeto mais próximo possível da realidade, diminuindo possíveis erros entre o simulado e o real.

Figura 68 - Paquímetro digital.

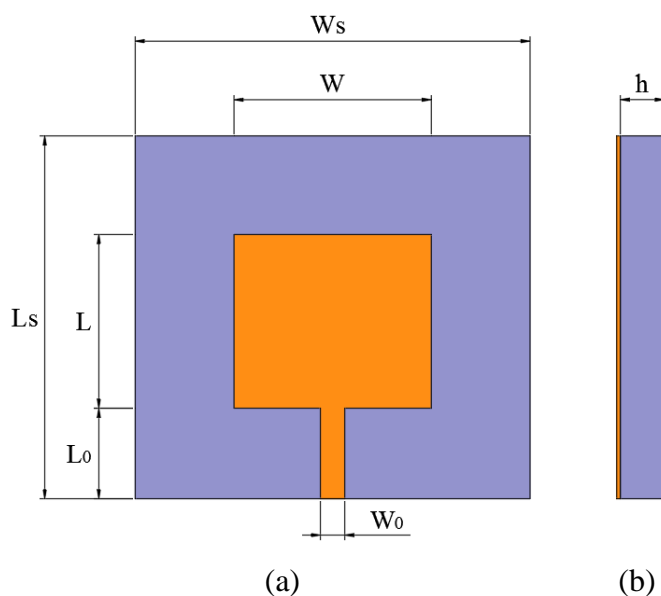


Fonte: Autoria própria.

### 3.2 PROJETO E SIMULAÇÃO

As propriedades elétricas e têxteis obtidas foram utilizadas no projeto das antenas, onde por meio de programa desenvolvido em linguagem Fortran, os modelos da cavidade e da linha de transmissão (ver seções 2.1.4.1 e 2.1.4.2), foram aplicados para calcular as dimensões de antenas de microfita com *patch* retangular alimentadas por linha de alta impedância (ver seção 2.1.3.1), como ilustra a Figura 69. As antenas foram projetadas para operar com uma frequência de ressonância de 2,45 GHz na faixa ISM, tendo em vista a ampla gama de aplicações, além de proporcionar baixo perfil e tamanho reduzido as antenas, facilitando a integração às roupas.

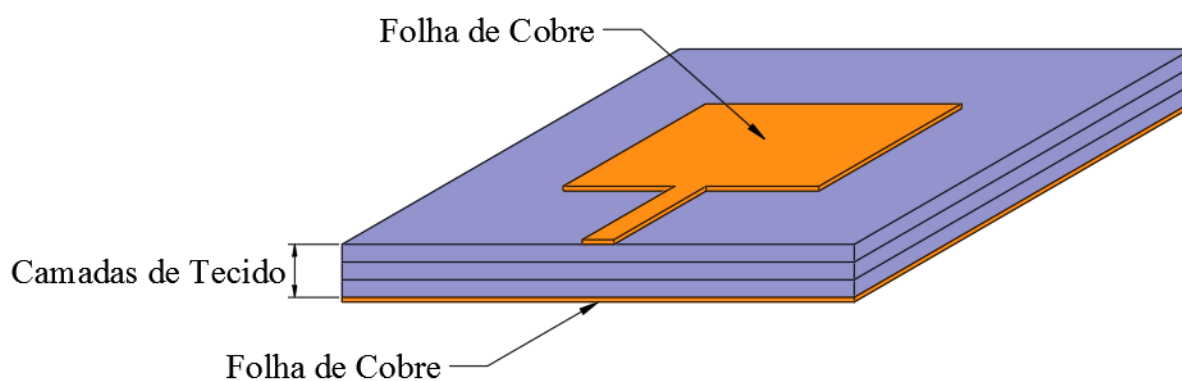
Figura 69 - Antena têxtil com *patch* retangular projetada: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral



Fonte: Autoria Própria.

Utilizou-se espessura e permissividade do substrato de acordo com as propriedades apresentadas por cada amostra. Com o intuito de diminuir as dimensões da antena, tendo em vista as baixas constantes dielétricas apresentadas pelos materiais têxteis em altas frequências (ver Tabela 3), e garantir o isolamento entre as partes condutoras visando a implementação do protótipo, optou-se por um substrato têxtil constituído por três camadas de tecido de malha sobrepostas, como mostra a Figura 70.

Figura 70 - Estrutura da antena têxtil projetada.

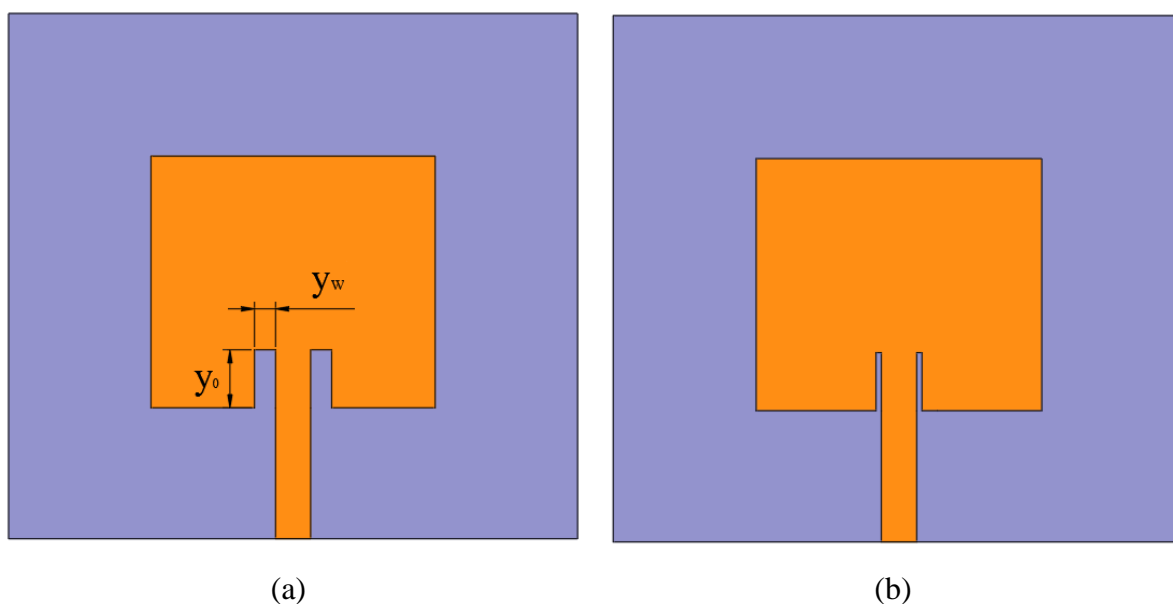


**Fonte:** Autoria própria.

Dessa forma, a partir da espessura dos tecidos, foi calculada a altura total dos substratos. O material utilizado nas partes condutoras (*patch* e plano de terra) do projeto foi o cobre com espessura de 0,5 mm, com intuito de aproximar o com a folha de cobre utilizada na fabricação das antenas. De posse dos tamanhos calculados, as antenas foram desenhadas e simuladas na faixa de frequência de 1 a 3 GHz com passo de 0,0067 (mesmas condições em que foram efetuadas as medições), no *software* Ansys HFSS® (*High Frequency Structural Simulator*), que utiliza o método numérico *FEM*, possibilitando a visualização de parâmetros como, coeficiente de reflexão, diagrama de radiação e densidade de corrente superficial. Novos materiais com as propriedades elétricas encontradas foram criados no programa. É importante ressaltar que devido a limitações de desenho gráfico, não foi possível simular a estrutura do tecido, obtendo-se apenas uma aproximação ao considerar o substrato totalmente sólido e de comportamento isotrópico.

A partir dos resultados de simulação apresentados, foi escolhido o tecido que proporcionou uma antena com características de operação mais adequadas, e aplicou-se técnicas de casamento de impedância (ver seção 2.1.4.3) para melhorar o ganho da antena e a perda de retorno. Dessa forma, fendas (*inset feed*) foram dimensionadas utilizando as Equações 54, 55 e 56, e aplicadas ao *patch* de forma aproximada para se adequar aos parâmetros de construção, como ilustra a Figura 71.

Figura 71 - Antenas com *inset feed* de dimensão  $y_w$  igual a: (a) 4 mm e (b) 1 mm.



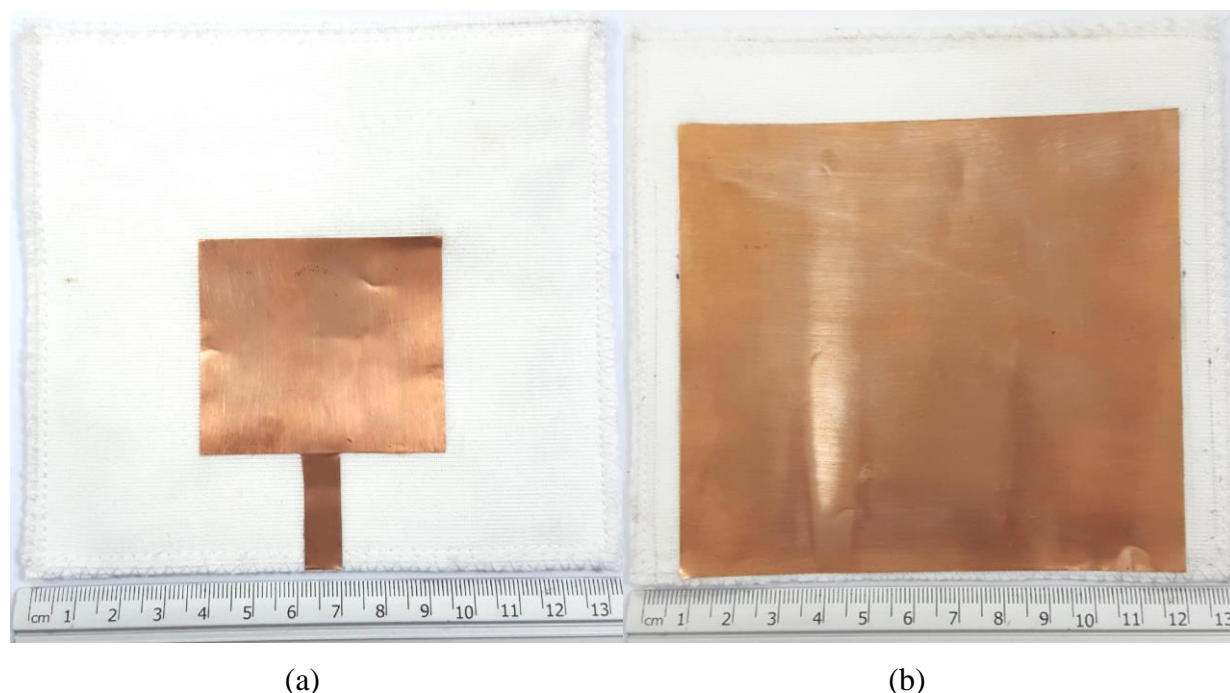
**Fonte:** Autoria própria.

### 3.3 IMPLEMENTAÇÃO E TESTES

Após a etapa de projeto e simulação o melhor resultado com base nas propriedades elétricas, estabilidade dimensional e condições de operação na frequência de projeto, foi escolhido para fabricação e teste. A antena foi fabricada de forma artesanal, onde, com auxílio de uma régua e uma tesoura, o tecido selecionado foi marcado e cortado em três retângulos com as dimensões calculadas do substrato acrescidas de 1 cm em ambos os lados, para permitir junção posterior sem maiores interferências na estrutura da antena. As três amostras de tecido foram dispostas em orientação biaxial (ver seção 2.2.2), visando uma distribuição mais homogênea do material, e, posteriormente, suas extremidades foram costuradas para garantir a estabilidade entre as camadas do substrato. Para as partes condutoras foi utilizado uma folha de cobre com condutividade de  $5,8 \times 10^7$  S/m e 0,05 mm de espessura. Esse material condutor foi

escolhido devido sua baixa resistividade, com o intuito de investigar de forma mais específica as perdas causadas pelo substrato têxtil, além de ser amplamente utilizado na fabricação de antenas de microfita e permitir certa conformidade e adaptabilidade a superfícies curvas. O *patch* e o plano de terra foram cortados por meio de régua e estilete, e fixados ao substrato através de adesivo a base de éster de cianoacrilato. A Figura 72 ilustra a antena têxtil construída.

Figura 72 - Antena têxtil construída visão: (a) Frontal e (b) Posterior.



**Fonte:** Autoria Própria.

Posteriormente, foi soldado à linha de transmissão e ao plano de terra, para permitir a alimentação e posteriores testes das antenas, o conector SMA-KE fêmea reverso de cobre banhado a ouro, com impedância de  $50 \Omega$  e faixa de operação de 0 a 6 GHz, apresentado na Figura 73.

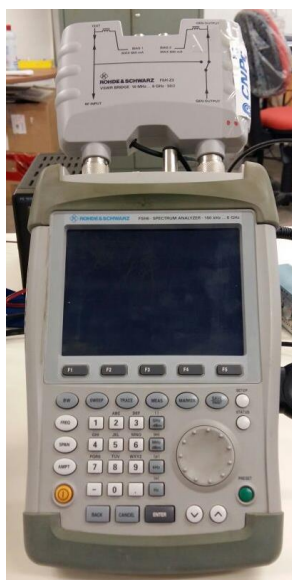
Figura 73 - Conector SMA-KE fêmea reverso.



**Fonte:** Autoria própria.

Após a etapa de confecção, a antena foi testada através de um Analisador de Espectro da Rohde & Schwarz modelo FSH6, como ilustra a Figura 74, com função integrada de ARV. Embora seja flexível, a antena portou-se firme durante as medições devido a sustentação provida pelas folhas de cobre que constitui as partes condutoras, sobretudo devido ao plano de terra. A partir desse ensaio foi possível obter parâmetros que possibilitaram a construção do gráfico dos coeficientes de reflexão e carta de Smith da antena.

Figura 74 - Analisador de Espectro.

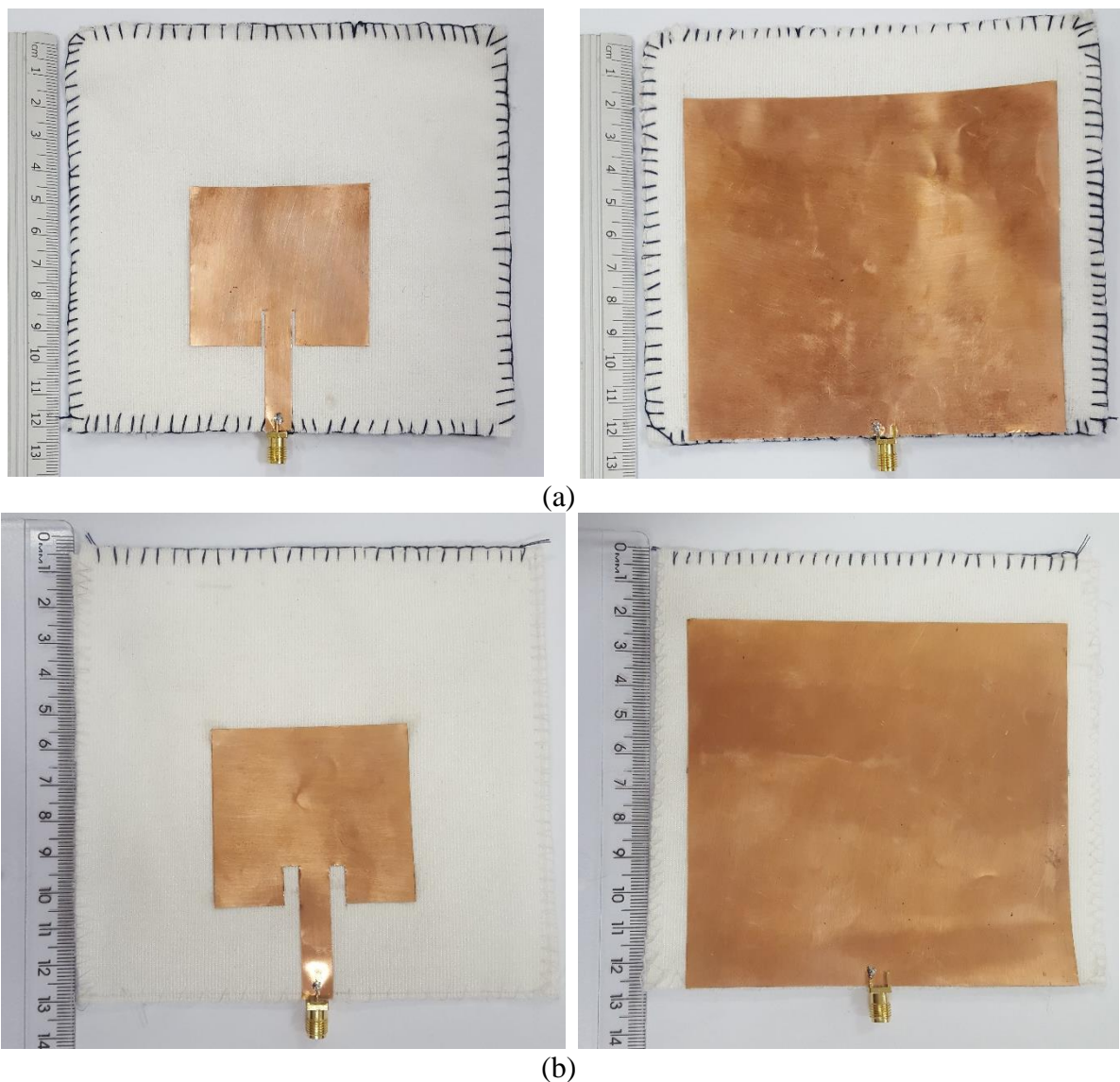


**Fonte:** Autoria Própria.

Os resultados apresentados pela primeira antena construída não foram satisfatórios. Dessa forma, foram implementadas duas antenas com *inset feed*, como ilustra a Figura 75.



Figura 75 – Vistas frontal (a esquerda) e posterior (a direita) das antenas têxteis com *inset feed* de largura: (a) 1 mm; (b) 4 mm.



Fonte: Autoria própria.

Embora calculadas, as dimensões das fendas foram aproximadas de acordo com as limitações impostas pela técnica manual de fabricação, onde se alcançou tamanhos para  $y_w$  de 1 mm (Figura 75.a) e 4 mm (Figura 75.b), e  $y_0$  igual a 11 mm.

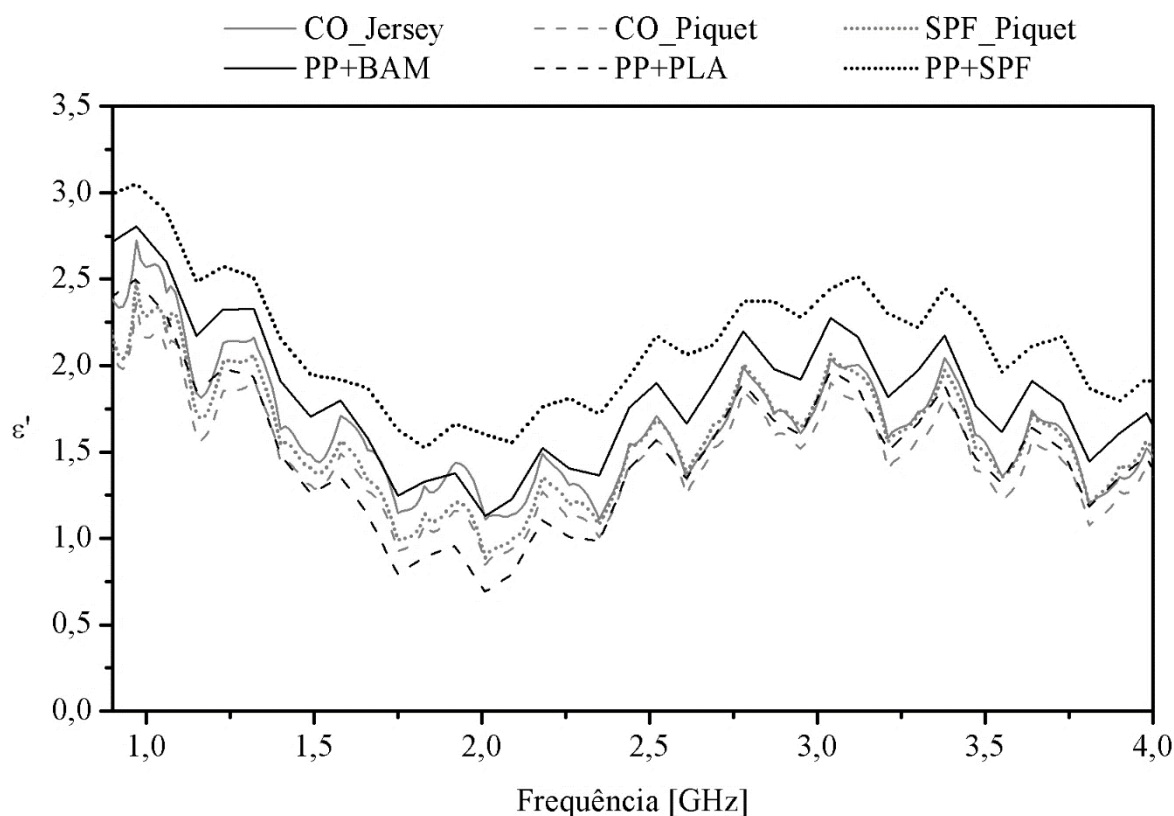
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados e analisados os principais resultados referentes as etapas de caracterização das amostras têxteis, além de projeto, simulação e teste da antena, comparando e avaliando os valores teóricos com os reais.

### 4.1 ANÁLISES ELÉTRICAS

A partir da etapa de caracterização elétrica (ver seção 3.1.1) os resultados de constante dielétrica e tangente de perdas foram obtidos e são apresentados nas Figura 76 e 77, respectivamente.

Figura 76 - Constante dielétrica dos tecidos malha.

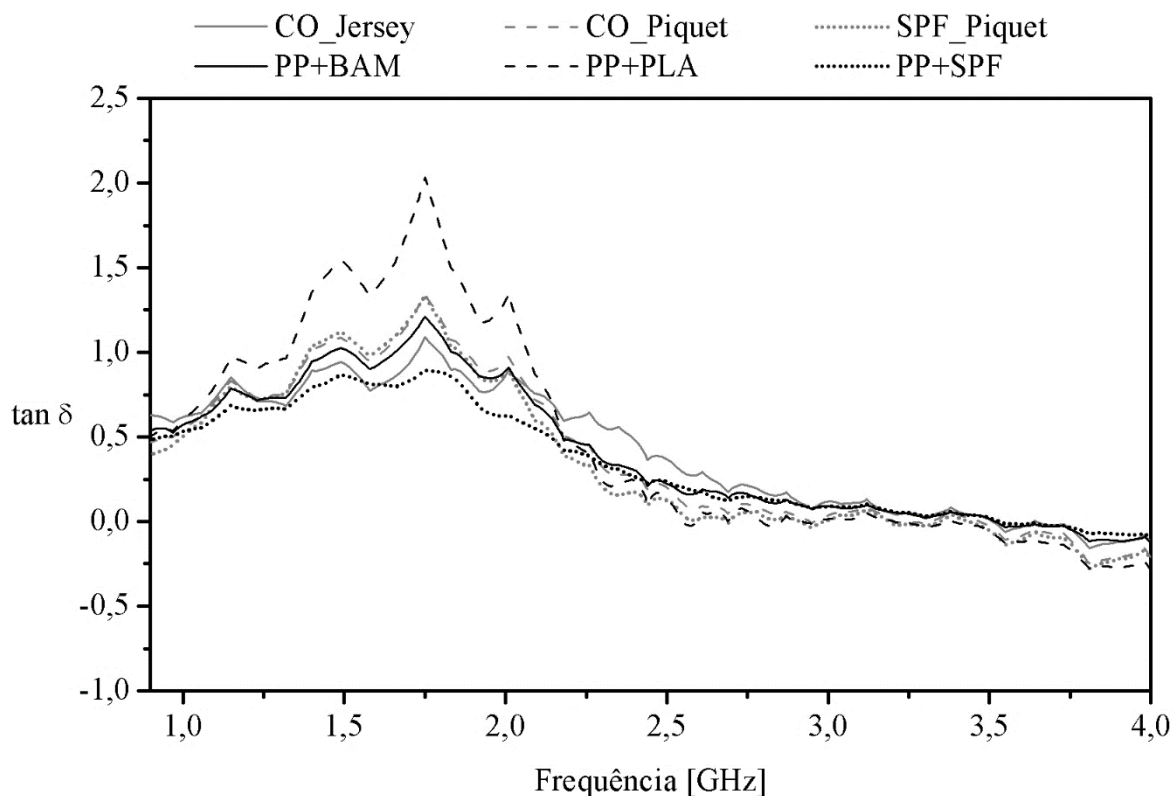


**Fonte:** Autoria própria.

É possível notar que as constantes dielétricas tiveram um comportamento gráfico bastante similar, sem grande discrepância e com valores variando em torno de 1,5 na faixa de frequência do padrão IEEE 802.11b (2,4 GHz – 2,48 GHz). Esses valores relativamente baixos

de constante dielétrica evidenciam as altas taxas de porosidade apresentadas pelos tecidos. No entanto, isso faz com que as perdas por ondas superficiais sejam reduzidas, e haja um aumento das ondas espaciais, elevando, conseqüentemente, a largura de banda.

Figura 77 - Tangente de Perdas dos tecidos analisados.



**Fonte:** Autoria própria.

Por meio da Figura 77, se observa a elevação das tangentes de perdas em frequências de microondas, atingindo seus valores máximos em 1,75 GHz, seguido por uma diminuição. Os valores negativos de tangentes de perdas apresentados na Figura 77 mostram que para valores acima da frequência de 3 GHz, é possível que esteja havendo o surgimento de ondas evanescentes e pode ser que o material esteja funcionando como um dispositivo atenuador.

Dentre as frequências existentes na faixa ISM, a frequência de 2,45 GHz é a mais utilizada em sistemas de comunicação sem fio (Wi-Fi, Bluetooth, rádio, etc.), possibilitando diversas aplicações para dispositivos que operam sob essa condição. A Tabela 7 mostra os valores de constante dielétrica, fator de perdas e tangente de perdas dos tecidos analisados para essa frequência.

Tabela 7 - Características elétricas dos tecidos analisados na frequência de 2,45GHz.

| <b>Tecido</b> | $\epsilon'$ | $\epsilon''$ | <b>tan <math>\delta</math></b> |
|---------------|-------------|--------------|--------------------------------|
| CO_Jersey     | 1,5453      | 0,5616       | 0,3634                         |
| CO_Piquê      | 1,4427      | 0,2688       | 0,1863                         |
| SPF_Piquet    | 1,5387      | 0,1459       | 0,0948                         |
| PP + SPF      | 1,7581      | 0,3728       | 0,2120                         |
| PP + PLA      | 1,4060      | 0,1341       | 0,0954                         |
| PP + BAM      | 1,9383      | 0,4390       | 0,2265                         |

**Fonte:** Autoria própria.

A tangente de perdas ideal é igual a zero, e, a partir da Tabela 7, é possível observar que as tangentes de perda para todas as amostras foram altas, mesmo quando comparadas a outros tecidos, como pode ser visto na Tabela 3 da seção 2.3.1.1. O tecido SPF\_Piquet apresentou o menor valor de tangente de perdas dentre as amostras, sendo 73,9% menor em comparação com o CO\_Jersey, que apresentou os maiores valores dos parâmetros analisados. É possível notar que a mudança de estrutura nos tecidos de algodão implicou numa variação de 0,1026 (7%) na constante dielétrica e 0,2686 (95%) na tangente de perdas. Já a mudança de composição de algodão para fibra de soja, comparando o CO\_Piquet com o SPF\_Piquet, fez com que houvesse alteração de 0,0960 e 0,0915, em  $\epsilon'$  e tan  $\delta$ , respectivamente. O tecido PP+PLA apresentou os menores valores dentre as amostras a base de polipropileno, apresentando uma diminuição de 27,5% e 57,9% na sua constante dielétrica e tangente de perdas, concomitantemente, em comparação com o PP+BAM, que apresentou os maiores resultados entre os tecidos a base de polipropileno.

É importante ressaltar que é possível compensar a baixa constante dielétrica aumentando a espessura do substrato (ver seção 2.1.2.3), no entanto, a tangente de perdas não é algo que possa ser corrigido. Dessa forma, os tecidos que têm maior potencial em termos de aplicação foram as amostras SPF\_Piquet e PP+PLA, que apresentaram os menores valores de tangentes de perda.

## 4.2 ANÁLISES TÊXTEIS

Os ensaios têxteis foram realizados com intuito de compreender as características físicas essenciais para o projeto e possível aplicação desses tecidos como substrato das antenas. O

conhecimento desses parâmetros é de fundamental importância quando se trata da reprodutibilidade desse material, pois permite ao pesquisador entender de que forma uma variação desses parâmetros pode influenciar nos parâmetros elétricos do substrato.

Do ensaio de titulação foram obtidos os valores de densidade linear dos fios através do sistema direto (ver seção 2.2.3.1), os dados de densidades superficial dos tecidos foram aferidos por meio do ensaio de gramatura, e os valores da espessura dos fios e tecidos a partir do paquímetro digital, estando os resultados para esses parâmetros dispostos na Tabela 8.

Tabela 8 - Título, gramatura e espessura dos tecidos.

| Tecido     | Título (TEX) | Gramatura (g/m <sup>2</sup> ) | Espessura (mm) |        |
|------------|--------------|-------------------------------|----------------|--------|
|            |              |                               | Fio            | Tecido |
| CO_Jersey  | 19,53        | 169,70                        | 0,18           | 0,58   |
| CO_Piquet  | 23,77        | 188,80                        | 0,18           | 0,66   |
| SPF_Piquet | 14,30        | 112,43                        | 0,14           | 0,58   |
| PP+SPF     | 15,37        | 258,57                        | 0,14           | 0,62   |
| PP+PLA     | 18,83        | 299,90                        | 0,20           | 0,70   |
| PP+BAM     | 20,50        | 320,80                        | 0,14           | 0,70   |

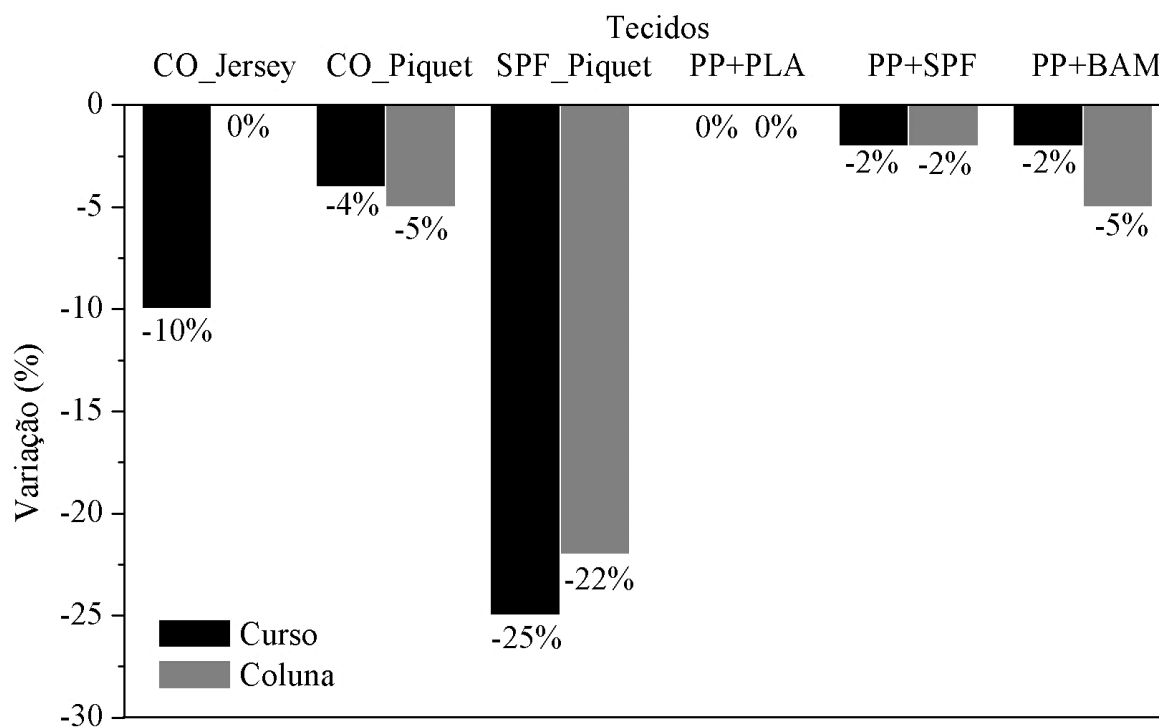
Fonte: Autoria própria.

O tecido que apresentou maiores valores de densidade linear e superficial, entre os dois a base de algodão, foi o CO\_Jersey. Isso implica numa presença mais elevada e concentrada desse material no tecido, e assim, uma constante dielétrica mais alta em comparação com a do ar presente nos poros. Os valores mínimos de título e gramatura corresponderam ao SPF\_Piquet, em torno de 39,7% e 40,4%, respectivamente, menor em comparação com o CO\_Piquet, implicando num tecido mais leve devido ao tamanho da laçada e ao material utilizado, já que possuem a mesma estrutura. É interessante observar que embora tenha uma menor densidade linear, o tecido a base de fibra de soja, apresentou uma maior constante dielétrica (ver Tabela 7) que o CO\_Piquet, decorrência de sua composição e de uma melhor distribuição do material presente no tecido. O PP+BAM apresentou maior gramatura entre as amostras analisadas. Como todos os tecidos a base de polipropileno possuem a mesma estrutura, é possível relacionar o fato deste tecido de malha ter a maior constante dielétrica, dentre outros fatores, a sua composição. O título do fio por ser maior e com uma baixa espessura, implica numa presença mais elevada e concentrada desse material na estrutura do tecido que possui uma das maiores espessuras. Os valores mínimos de título e gramatura para os tecidos compostos

por polipropileno estão relacionados ao PP+SPF, cerca de 25,0% e 19,4%, respectivamente, menor em comparação com as estruturas de fio de bambu, implicando num tecido mais leve.

Através do ensaio de estabilidade dimensional aferiu-se a variação no tamanho do curso e da coluna dos tecidos e, os resultados são mostrados na Figura 78.

Figura 78 - Estabilidade dimensional.

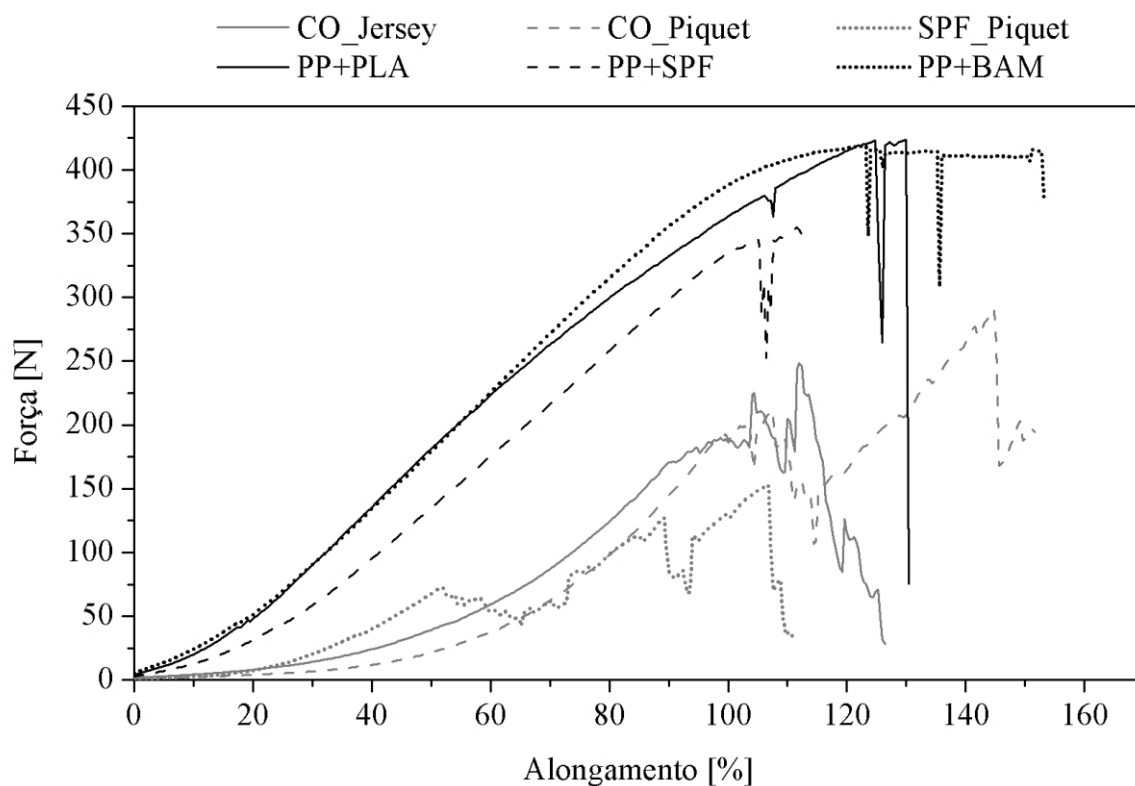


Fonte: Autoria própria.

Através da Figura 78 é possível observar que os tecidos de malha compostos por polipropileno apresentaram uma boa estabilidade dado a natureza desequilibrada da sua estrutura. O PP+PLA apresentou a melhor estabilidade em ambos os sentidos, sendo o PP+SPF o segundo mais estável de maneira geral. Para aplicação em antenas quanto mais estável for o tecido, melhor, pois o encolhimento ou alargamento das fibras, afeta diretamente a geometria e propriedades mecânicas das antenas, que são condições fundamentais para conservar as características de funcionamento projetadas da mesma. Ressalta-se ainda a fragilidade do tecido SPF\_Piquet que apresentou os maiores valores de variação dimensional, sendo considerado frágil e instável.

Os dados de resistência à tração nos sentidos da coluna, disposto na Figura 79, e do curso, apresentado na Figura 80, para as amostras dos tecidos analisados foram processados e os valores máximos de alongamento e força para cada são apresentados na Tabela 9.

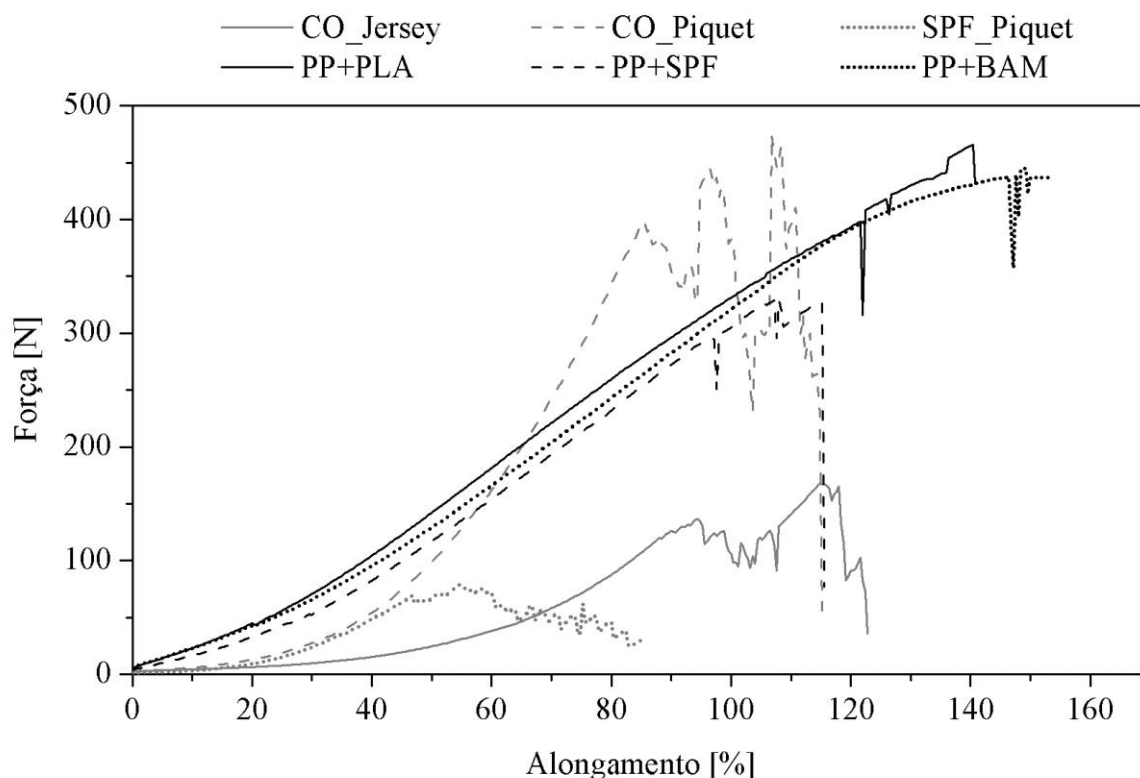
Figura 79 - Resistência a tração no sentido da coluna



Fonte: Autoria própria.

Através da Figura 79, relacionou-se os valores de alongamento e força para o primeiro mínimo do CO\_Jersey (88%; 119,44 N) e do CO\_Piquet (85,2%; 398,94 N), onde o este apresentou uma variação de -2,8% e +225,6% de alongamento e força, respectivamente, em relação ao primeiro, evidenciando a influência da estrutura do tecido. Analisando o efeito da modificação da composição entre o CO\_Piquet e o SPF\_Piquet (46,82%; 69,2 N), foi possível estimar uma diferença de +476,5% de força e +81,97% de alongamento, do primeiro em comparação ao segundo. Para as amostras a base de polipropileno, a diferença entre os valores entre o PP+SPF (105,2%, 345,48 N) e PP+PLA (106,0%, 379,54 N) não foi tão significativa, quanto em comparação ao PP+BAM (123,2%, 418,52 N), que dentre todos os tecidos apresentou maior alongamento e força no primeiro declínio, podendo este fato ser associado a maior rigidez que a fibra de bambu proporciona quando combinada ao PP (ver seção 2.2.1).

Figura 80 - Resistência a tração no sentido do curso.



Fonte: Autoria própria.

Ao comparar o primeiro mínimo do CO\_Jersey (90%; 170,82 N) com o do CO\_Piquet (99,6%; 192,4 N), na Figura 80, é possível notar que a mudança de estrutura causou um aumento de 10,6% na deformação no sentido do curso e um acréscimo de 12,6% na força. Já para uma mudança de composição, numa análise entre o CO\_Piquet e SPF\_Piquet (51,6%; 72,42 N), houve um decréscimo de 48,2% no alongamento e uma diminuição de 62,35%, da tensão. O PP+SPF (96,8%, 295,5N) apresentou os menores valores em comparação com o PP+PLA (121,6%, 398,28N) e PP+BAM (146%, 437N), que mais uma vez, obteve os maiores valores de alongamento e força para o primeiro declínio.

Tabela 9 - Valores máximos de resistência a tração.

| Tecido     | Curso           |           | Coluna          |           |
|------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
|            | Alongamento (%) | Força (N) | Alongamento (%) | Força (N) |
| CO_Jersey  | 126,4           | 248,7     | 122,8           | 167,7     |
| CO_Piquet  | 151,6           | 291,2     | 115,2           | 475       |
| SPF_Piquet | 110,8           | 152,6     | 85,2            | 79,32     |
| PP + SPF   | 148,00          | 148,00    | 137,60          | 433,20    |



| Tecido   | Curso           |           | Coluna          |           |
|----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
|          | Alongamento (%) | Força (N) | Alongamento (%) | Força (N) |
| PP + PLA | 140,80          | 140,80    | 130,40          | 423,40    |
| PP + BAM | 153,20          | 153,20    | 153,20          | 418,52    |

Fonte: Autoria própria.

É possível notar que no sentido do curso, os tecidos a base de PP apresentaram valores de força de tração e alongamento variando em torno de 450N e 145%, respectivamente. Já no sentido da coluna, os tecidos variaram os valores de força de tração por volta de 400N e alongamento em torno de 140%. Ressalta-se a amostra a base de fio de bambu que, nesse sentido, foi a mais elástica em comparação aos outros tecidos. Entre os tecidos a base de fibra de algodão, destaca-se o CO+Piquet, que foi o mais resistente em ambos os sentidos da estrutura. O SPF\_Piquet, apresentou a menor resistência e elasticidade, reforçando a característica frágil de sua composição e estrutura. Observa-se ainda, que a deformação no sentido da coluna, em todos os casos, foi menor do que no sentido do curso, isso ocorre devido a formação de pontos de pressão (nós) que geram uma força opositora a tração aplicada ao tecido no sentido da coluna. No sentido do curso, a influência desses pontos é muito menor, e por essa razão, geralmente, o alongamento é maior. Esse dado é importante quando se parte para a implementação e aplicação do tecido em antenas de microfita, vez que esta deve ser confeccionada e posicionada considerando sempre os locais onde sofra a menor deformação possível e, caso seja tracionada, resista ao máximo antes da ruptura.

A Tabela 15, no Apêndice A, mostra de forma concisa todas as propriedades obtidas nas caracterizações elétrica e têxtil dos tecidos analisados.

#### 4.3 ANÁLISES DO PROJETO E SIMULAÇÕES

A partir da etapa de projeto, as dimensões das antenas de microfita de *patch* retangular para cada tipo de tecido analisado foram calculadas e os valores encontram-se dispostos na Tabela 10 (para melhor compreensão, veja a Figura 69).

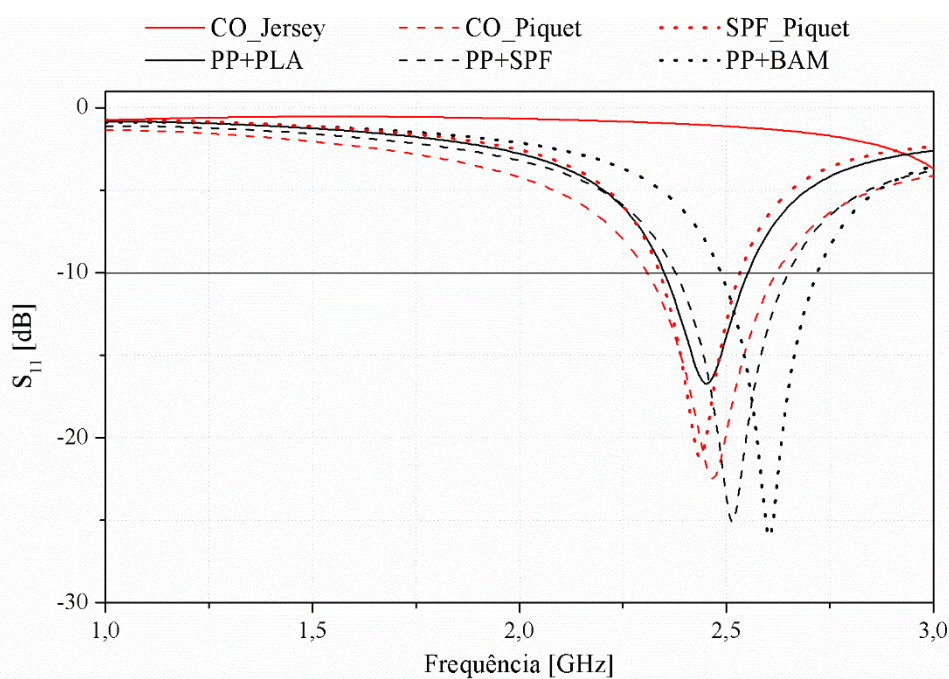
Tabela 10 - Dimensões das antenas projetadas com diferentes substratos têxteis.

| Tecido     | Patch   |         | Linha de transmissão |                     | Substrato           |                     |        |
|------------|---------|---------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------|
|            | W (mm)  | L (mm)  | W <sub>0</sub> (mm)  | L <sub>0</sub> (mm) | L <sub>s</sub> (mm) | W <sub>s</sub> (mm) | h (mm) |
| CO_Jersey  | 54,2338 | 47,8422 | 6,7062               | 24,9416             | 108,4676            | 99,7662             | 1,7400 |
| CO_Piquet  | 55,3611 | 49,2096 | 7,9422               | 25,7943             | 110,7222            | 103,1772            | 1,9800 |
| SPF_Piquet | 54,3043 | 47,9399 | 6,7215               | 24,9920             | 108,6085            | 99,9679             | 1,7400 |
| PP+SPF     | 52,0996 | 44,8893 | 6,6299               | 23,4885             | 104,1992            | 93,9541             | 1,8600 |
| PP+PLA     | 55,7817 | 49,6965 | 8,5373               | 26,1216             | 111,5634            | 104,4864            | 2,1000 |
| PP+BAM     | 50,4768 | 42,6683 | 7,0572               | 22,4770             | 100,9535            | 89,9080             | 2,1000 |

Fonte: Autoria própria.

É possível notar que as dimensões das antenas diferiram pouco, isso decorre da pequena variação da constante dielétrica entre os tecidos, bem como de suas espessuras. Através das dimensões obtidas, as antenas foram desenhadas e simuladas e os resultados de perda de retorno para as seis antenas iniciais encontram-se dispostos na Figura 81.

Figura 81 – Coeficientes de reflexão simulados para as antenas com diferentes substratos têxteis.



Fonte: Autoria própria.

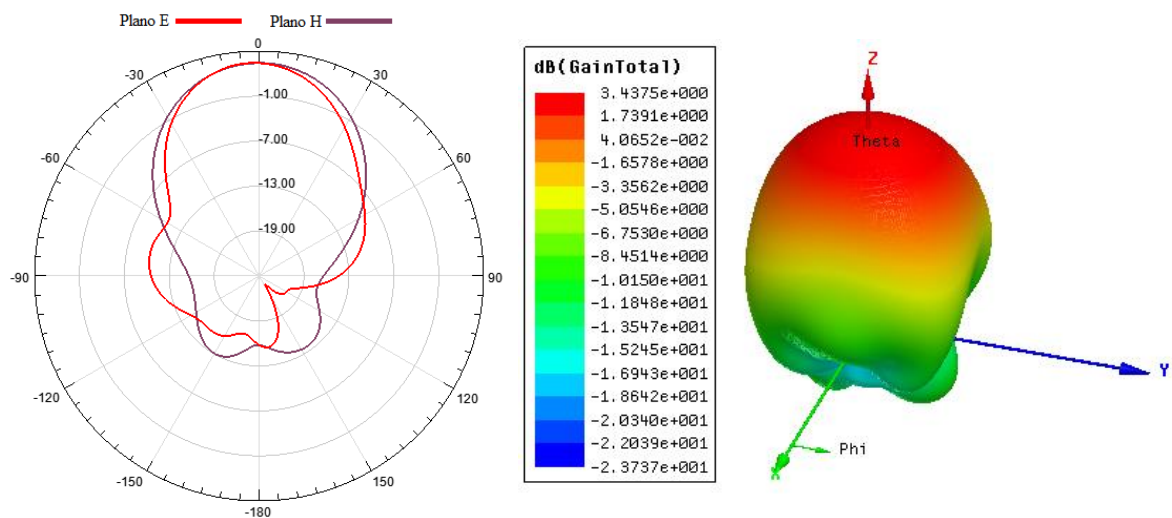
Por meio da análise da Figura 81 é possível notar que a antena com substrato CO\_Jersey foi a única que não ressoou na faixa de frequência estipulada, apresentando indicação do seu

primeiro modo para um valor acima de 3 GHz. Esse resultado pode ser atribuído a não adequação dos modelos da Cavidade e Linha de Transmissão para materiais com valores de tangente de perdas elevadas (nesse caso, acima de 0,3), vez que ambas as técnicas de projeto não incluem esse parâmetro, nos cálculos de dimensionamento e o *software*, que trabalha com modelos de onda completa, considera. Contudo, se aplicado técnicas de casamento de impedância, essa frequência de ressonância poderia ser reduzida até atingir o valor desejado.

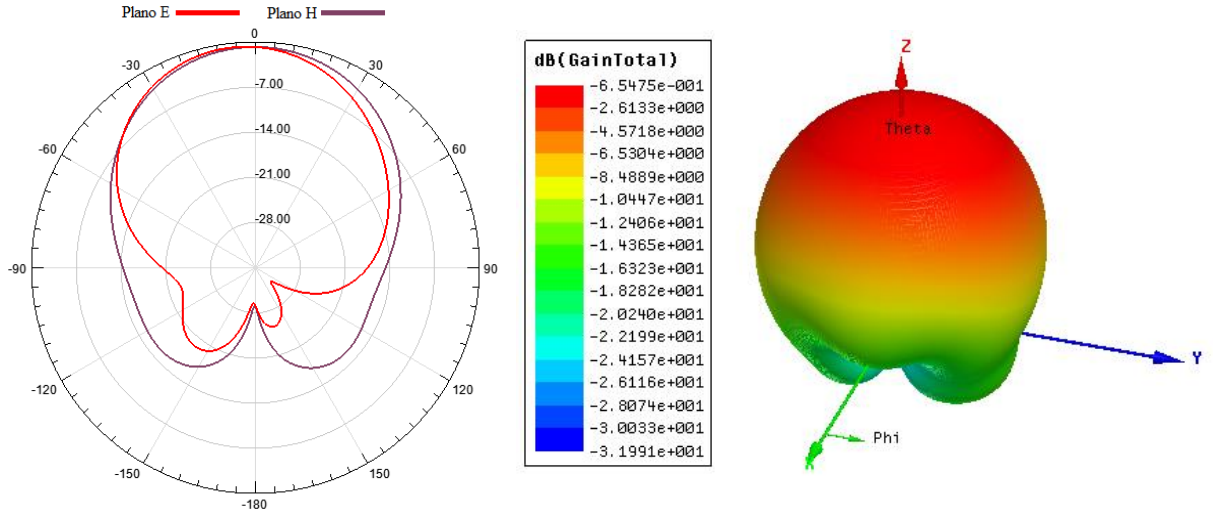
As demais antenas ressoaram abaixo de -10 dB, estando dentro da faixa de aplicação para o padrão IEEE 802.11b da banda ISM (ver Figura 1) e validando os métodos de projeto para esse tipo de antenna. Além disso, todas as antenas que ressoaram apresentaram uma banda larga (acima de 2%), decorrência dos baixos valores de constante dielétrica apresentados pelos tecidos (ver Tabela 7). A antenna de CO\_Piquet foi a detentora do maior valor de largura de banda (12%), enquanto a de PP+BAM possui o menor coeficiente de reflexão (-25,9822 dB), esses fatos podem ser atribuídos, respectivamente, a baixa e alta constante dielétricas que esses tecidos apresentaram. Embora tenha apresentado o maior valor de  $S_{11}$  (-16,7357 dB) dentro das condições de simulação estabelecidas, o PP+PLA foi o que mais se aproximou da frequência de operação escolhida, ressoando em 2,4533 GHz, decorrência de sua baixa tangente de perdas.

Para avaliar a diretividade e ganho das antenas têxteis simuladas, foram plotados os diagramas de radiação 2D e 3D para a frequência de ressonância de cada dispositivo, estando os resultados dispostos na Figura 82.

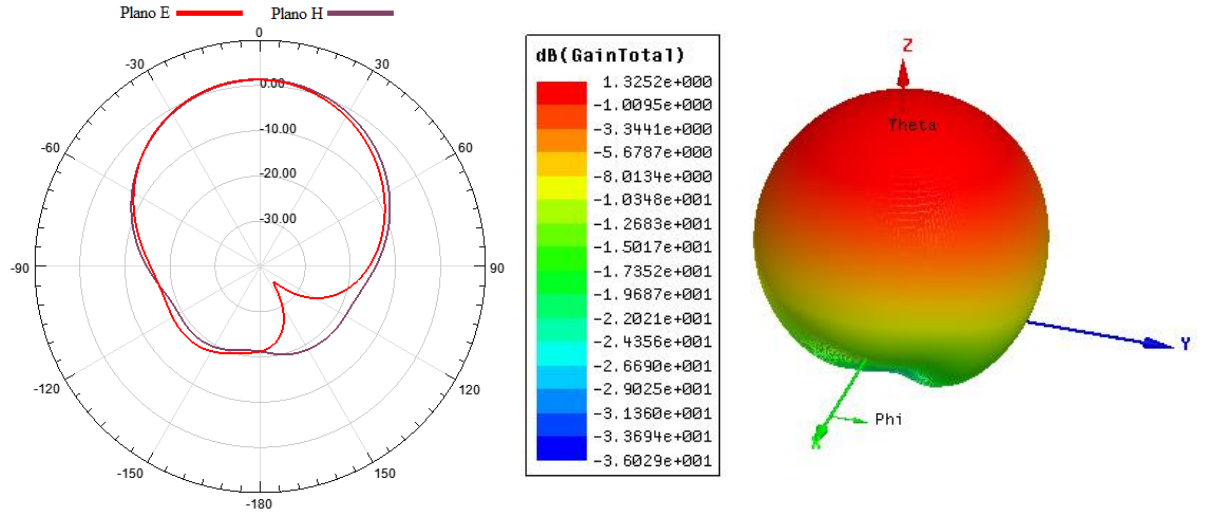
Figura 82 – Diagramas de radiação 2D e 3D das antenas têxteis simuladas na frequência de ressonância.



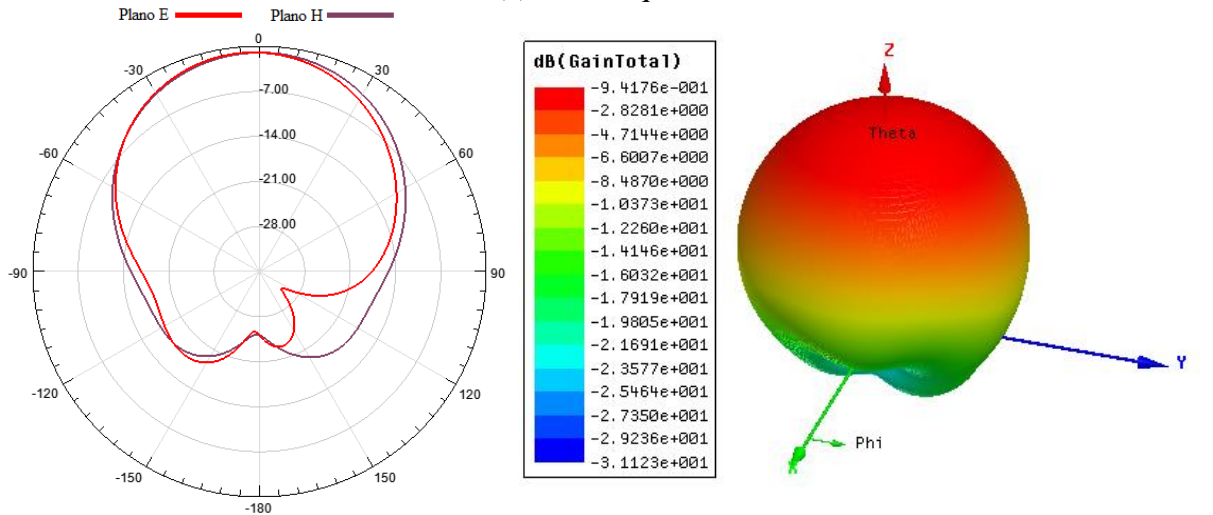
(a) CO\_Jersey



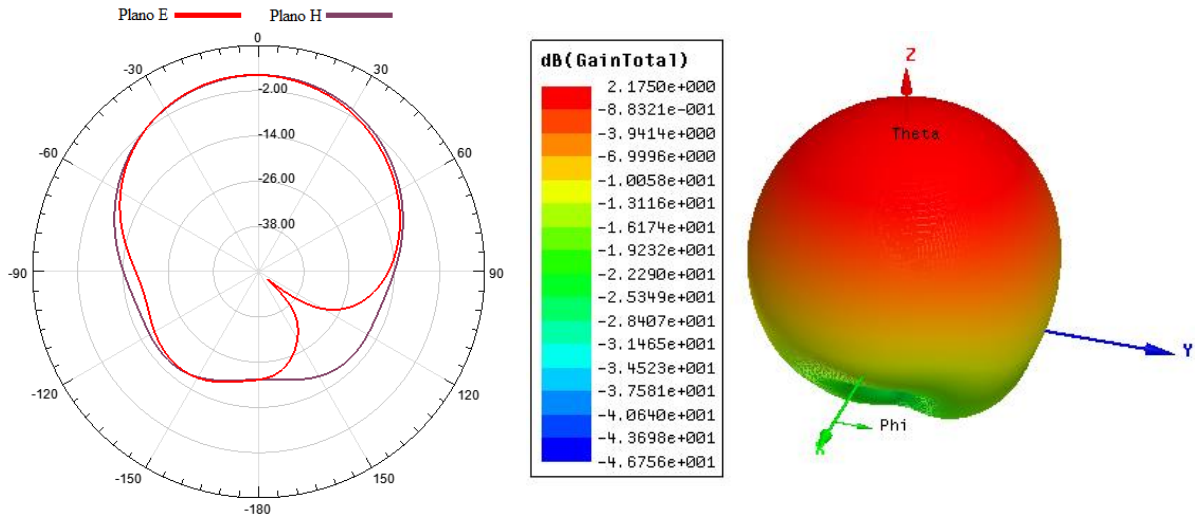
(b) CO\_Piquet



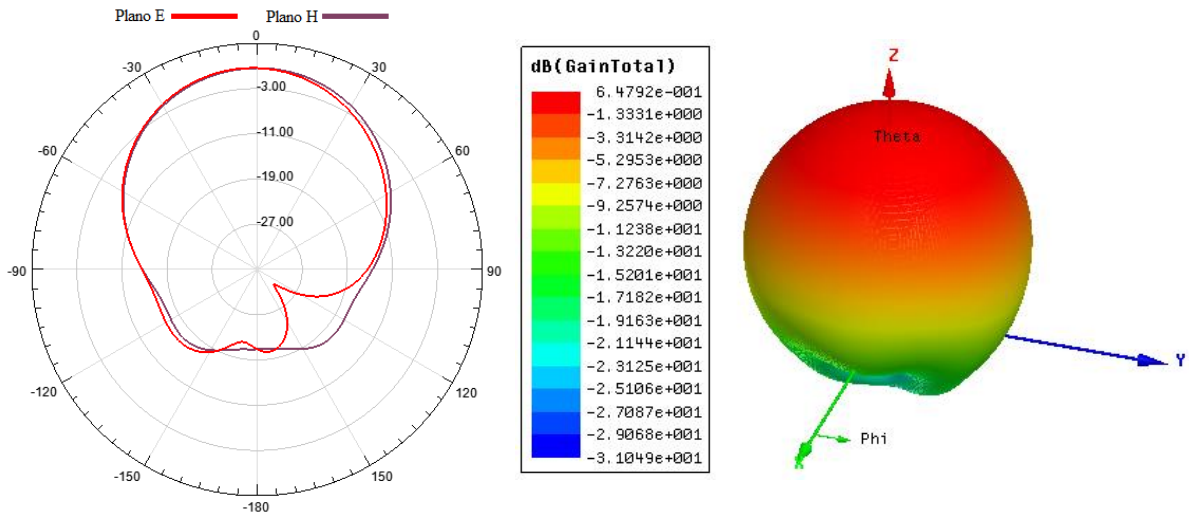
(c) SPF\_Piquet



(d) PP+SPF



(e) PP+PLA



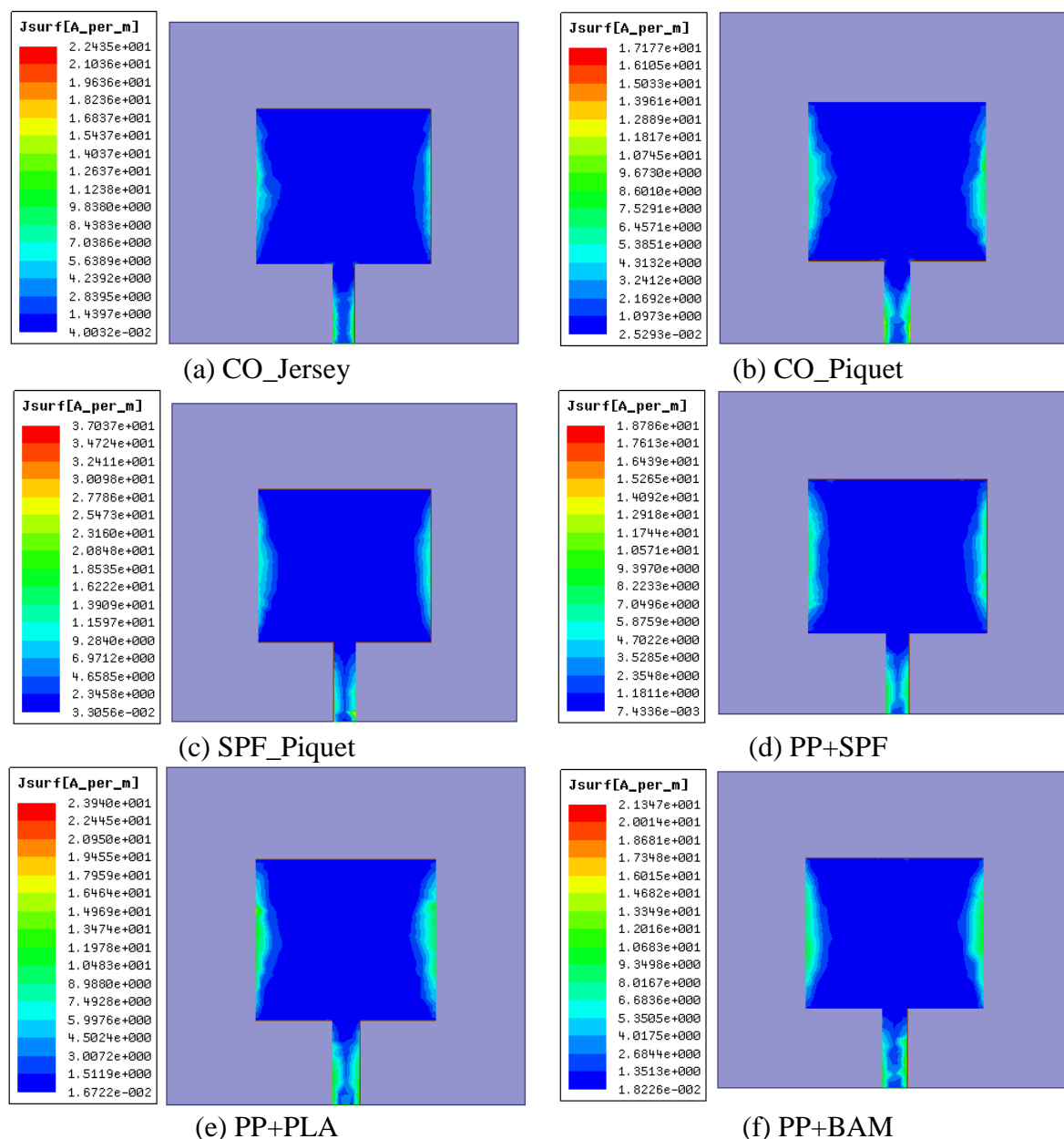
(f) PP+BAM

Fonte: Autoria própria.

Analisando os diagramas de radiação exibidos na Figura 82 é possível notar que não houveram variações significativas entre as antenas têxteis simuladas, onde todas apresentaram características *broadside* (ver seção 2.1.2.1). Isto ocorre devido às dimensões do plano de terra serem iguais às do substrato da antena, ocasionando a radiação da potência transmitida na direção do vetor normal ao plano do *patch* da antena. As distorções apresentadas pelos lóbulos secundários das antenas são atribuídas as tangentes de perda dos tecidos, onde o CO\_Jersey, PP+SPF e PP+BAM são, em ordem, os detentores das maiores tangentes de perda e, conseqüentemente, menor diretividade. Entre as antenas que obtiveram maior ganho destacam-se, em seqüência decrescente, PP+PLA (2,1750 dB) e SPF\_Piquet (1,3252 dB), decorrência das suas baixas tangentes de perda. O padrão de radiação da antena com CO\_Jersey é o mais distinto e apresenta baixa diretividade, isso ocorre devido a sua alta tangente de perdas na frequência

escolhida para o projeto. A Figura 83 ilustra a disposição da densidade linear das antenas têxteis projetadas para as respectivas frequências de ressonância.

Figura 83 - Densidades de corrente das antenas têxteis simuladas na frequência de ressonância



Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 83, observa-se um comportamento da densidade linear de corrente similar entre as antenas, onde este parâmetro concentra-se mais na linha de transmissão e extremidades das antenas, isto ocorre devido ao efeito de fracionamento (ver seção 2.1.4.1) ser mais intenso nessa região devido a sua pequena espessura. As antenas CO\_Jersey e PP+BAM apresentaram menor efeito de fracionamento, isto ocorre devido as altas tangentes de perdas

associadas a estes materiais, fazendo com que as perdas por efeito Joule ocorram também no substrato. Devido à alta constante dielétrica do PP+BAM, é possível notar uma presença maior do efeito de franjamento nas extremidades laterais da superfície do *patch*, quando comparado ao CO\_Jersey que tem menor  $\epsilon'$ . As antenas com PP+PLA e SPF\_Piquet, apresentaram densidades máximas de corrente iguais a 23,9400 A/m e 37,0370 A/m, respectivamente, isso ocorre devido as baixas tangente de perdas e constantes de dielétricas medianas. Como consequência, essas antenas apresentaram menores perdas de retorno, pois parte da energia que seria transmitida, foi dissipada em forma de calor no *patch*. A Tabela 11 apresenta de forma concisa os principais parâmetros elétricos de operação das antenas têxteis simuladas.

Tabela 11 – Principais características elétricas das antenas têxteis simuladas.

| Antena     | $f_r$ (GHz) | BW       |         | $S_{11}$ (dB) | $G_{\text{máximo}}$ (dB) | $J_{\text{máxima}}$ (A/m) |
|------------|-------------|----------|---------|---------------|--------------------------|---------------------------|
|            |             | (MHz)    | (%)     |               |                          |                           |
| CO_Jersey  | -           | -        | -       | -             | 3,4375                   | 22,4350                   |
| CO_Piquet  | 2,4667      | 311,0000 | 12,6182 | -22,4846      | -0,6548                  | 17,1770                   |
| SPF_Piquet | 2,4333      | 194,7000 | 7,9938  | -21,1609      | 1,3252                   | 37,0370                   |
| PP+SPF     | 2,5133      | 272,7000 | 10,8488 | -25,1267      | -0,9418                  | 18,7860                   |
| PP+PLA     | 2,4533      | 203,8000 | 8,3167  | -16,7357      | 2,1750                   | 23,9400                   |
| PP+BAM     | 2,6067      | 233,5000 | 8,9699  | -25,9822      | 0,6479                   | 21,3470                   |

Fonte: Autoria própria.

A partir da Tabela 11 é possível notar que a antena a base de PP+PLA apresentou maior ganho e foi a única que ressoou na frequência de projeto, porém apresentou a maior perda de retorno. Para melhorar o parâmetro de perda de retorno são utilizadas técnicas de casamento de impedância, nesse caso, inserção de *inset feed* no *patch* (ver seção 2.1.4.3). Assim, foram calculadas as dimensões dessas fendas para a antena com substrato de PP+PLA e os valores encontram-se dispostos na Tabela 12 (ver Figura 71 para melhor compreensão).

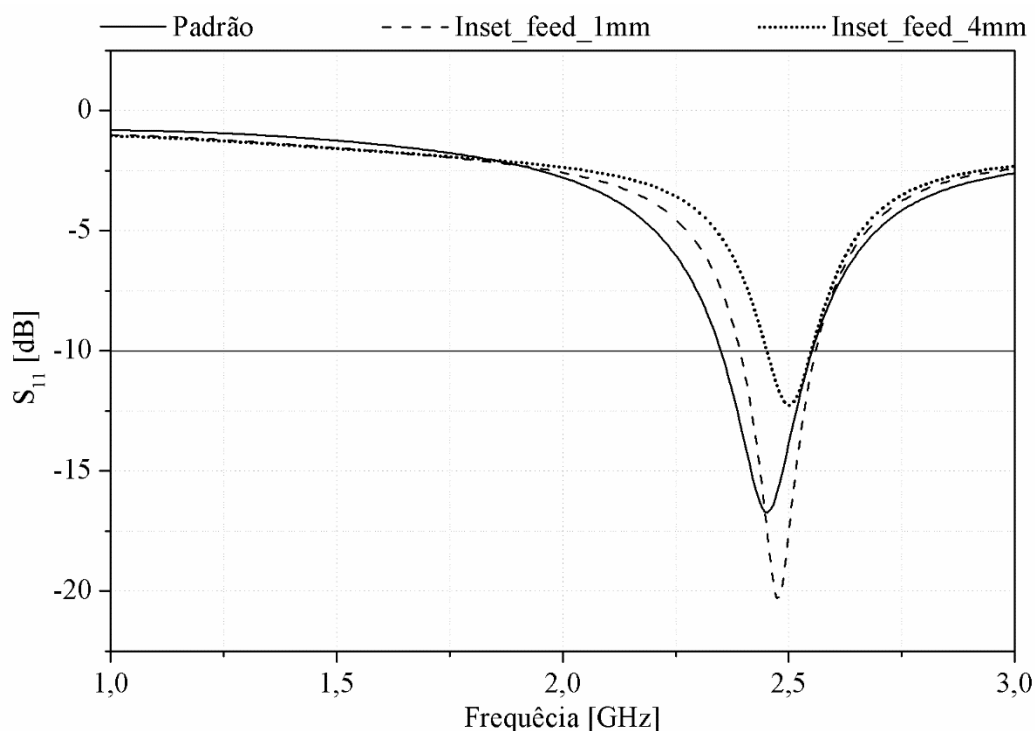
Tabela 12 - Dimensões para antenas com substrato de PP+PLA e *inset feed*.

| Patch  |        | Linha de transmissão |            | Substrato |              |        | Inset Feed |              |
|--------|--------|----------------------|------------|-----------|--------------|--------|------------|--------------|
| W (mm) | L (mm) | $W_0$ (mm)           | $L_0$ (mm) | Base (mm) | Largura (mm) | h (mm) | $y_0$ (mm) | $y_w$ (mm)   |
| 55,78  | 49,69  | 8,53                 | 26,12      | 111,56    | 104,48       | 2,10   | 11,00      | 1,00<br>4,00 |

Fonte: Autoria própria.

A partir desses tamanhos, foram inseridas as fendas no *patch* da antena PP+PLA, que, passará, daqui em diante, a ser chamada de Padrão e servirá de base para comparação com as antenas que possuem *inset feed* de larguras distintas,  $y_w = 1$  mm (Inset\_Feed\_1mm) e  $y_w = 4$  mm (Inset\_Feed\_4mm). Os coeficientes de reflexão para as antenas com *inset feed* simuladas podem ser vistas na Figura 84.

Figura 84 – Coeficientes de reflexão simulados para antenas com substrato de PP+PLA.

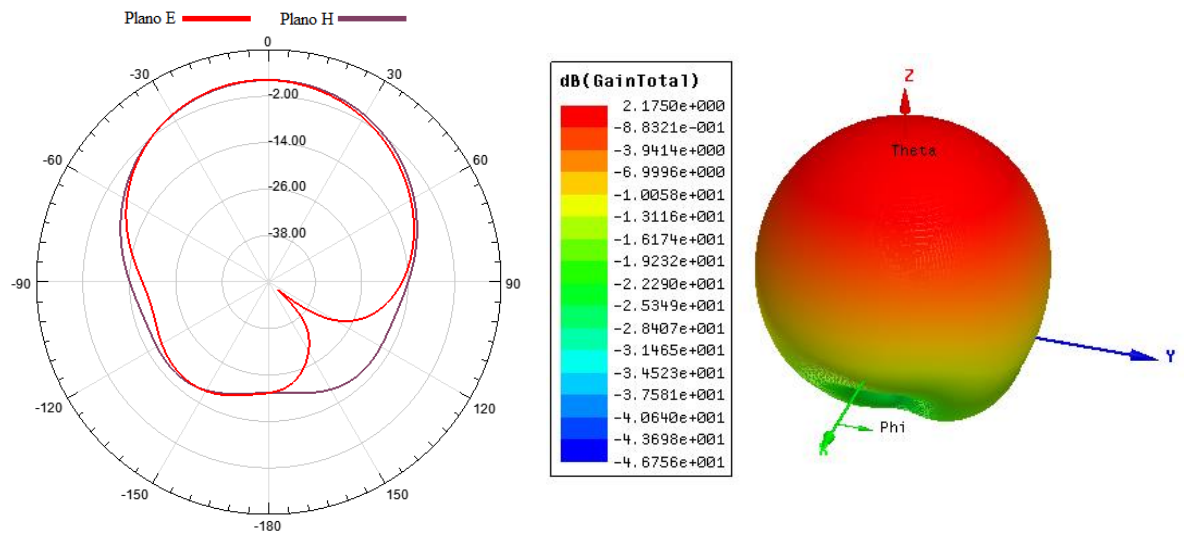


**Fonte:** Autoria própria.

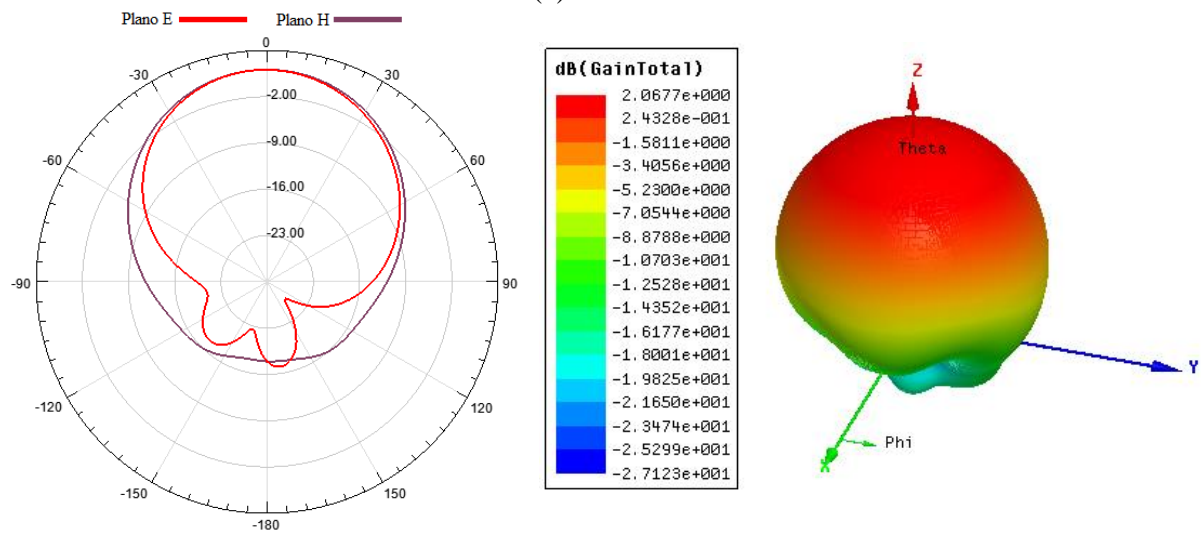
A inserção do *inset feed* de largura de 1 mm fez com que a antena ressoasse em 2,4733 GHz e ocasionou uma diminuição de 21,32% no coeficiente de reflexão (-20,3034 dB) e de 1,5389 % na largura de banda (167,4 MHz) em comparação com a antena Padrão. Já a antena com *inset feed* de 4 mm ressoou a uma frequência de 2,5 GHz, com largura de banda de 98,6 MHz (3,9440%) e coeficiente de reflexão de -12,2752 dB, cerca de 26,65% maior em comparação com a antena Padrão. Isso pode ser atribuído ao efeito capacitivo criado devido a inserção das fendas no *patch*, que modifica ainda a impedância de entrada desta. A Figura 85 ilustra os diagramas de radiação para as antenas com substrato de PP+PLA simuladas na frequência de ressonância de cada antena.



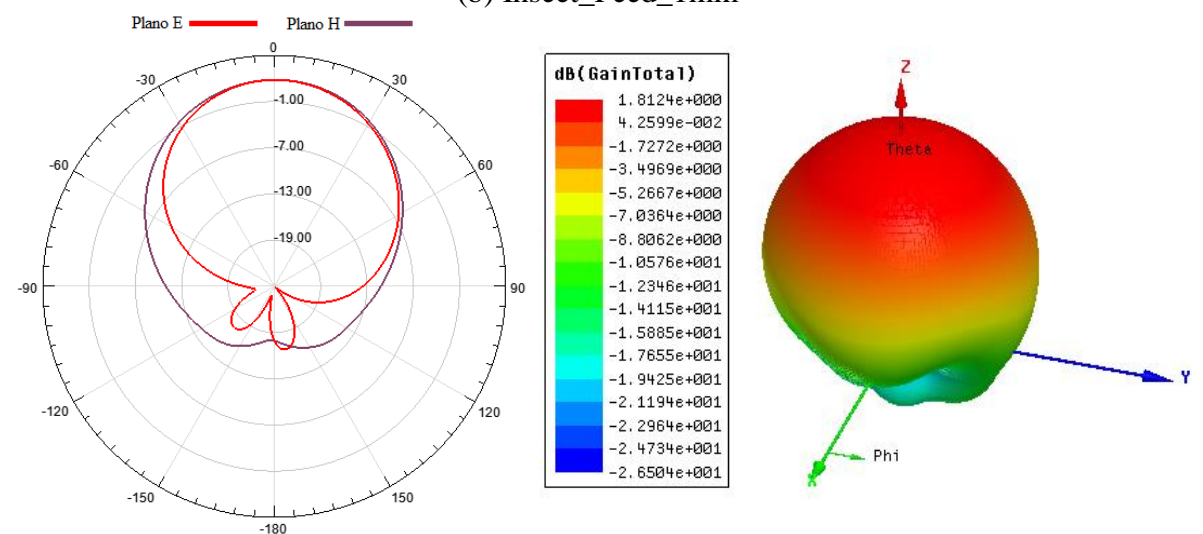
Figura 85 - Diagramas de radiação 2D e 3D para as antenas com substrato de PP+PLA a frequência de ressonância.



(a) Padrão



(b) Insect\_Feed\_1mm

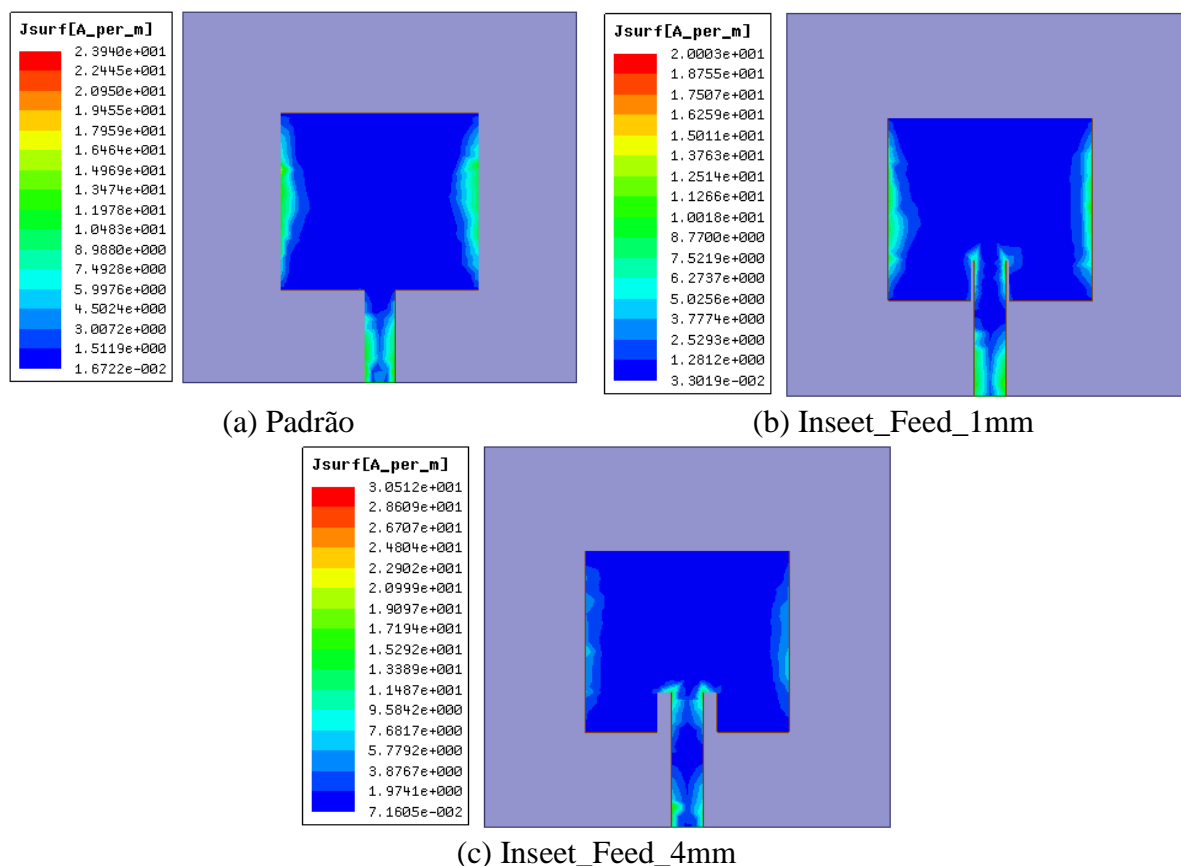


(c) Insect\_Feed\_4mm

Fonte: Autoria própria.

O formato do diagrama de radiação não sofreu alterações significativas em relação a mudança da largura das fendas. Contudo, ao comparar a Padrão (Figura 85.a) com as antenas que possuem fenda (Figuras 85.b-c), percebe-se uma diminuição dos lóbulos secundários do campo elétrico, decorrência do efeito capacitivo gerado pelos *inset feed* no *patch*, já os campos magnéticos são modificados devido diminuição de cobre no ressoador, o que provoca uma alteração do efeito indutivo causado por esse elemento. Em relação ao ganho máximo, as antenas com *inset feed* de 1 mm e 4 mm, apresentaram, respectivamente, uma diminuição de 7,73% e 16,62% em relação a antenna Padrão, para a frequência de 2,45 GHz. Isso ocorre, porque ao inserir as fendas no elemento irradiador, a impedância de entrada da antenna muda e, conseqüentemente os parâmetros de operação. As densidades lineares de corrente para as antenas simuladas são apresentadas na Figura 86.

Figura 86 - Densidade de corrente para antenas com substrato de PP+PLA a frequência de ressonância.



Fonte: Autoria própria.

Ao inserir os *inset feed*, o efeito de franjamento nas extremidades do *patch* e linha de transmissão é reduzido e cria-se uma nova distribuição da corrente de superfície no condutor, onde na região das fendas, há a presença maior de cargas em movimento devido a concentração de campos elétricos decorrentes do efeito capacitivo criado nesse local. É importante ressaltar que a frequência de operação estabelecida é de 2,45 GHz, e como as propriedades do *patch* mudaram após a inclusão das fendas, o comportamento da densidade linear de corrente para essa frequência também é alterado. Ao observar a Figura 84, é notável que os coeficientes de reflexão são maiores para frequência de 2,45 GHz, sendo essa perda atribuída a densidade de corrente, que varia -16,44% e +27,45% para as antenas com *inset feed* de 1 mm e 4 mm, respectivamente, quando em comparação com a antena padrão. A Tabela 13, mostra de forma resumida os principais parâmetros de operação para as antenas simuladas com substrato de PP+PLA antes e após a aplicação das fendas.

Tabela 13 - Características elétricas das antenas simuladas com substrato de PP+PLA.

| Antena         | $f_r$ (GHz) | BW       |        | $S_{11}$ (dB) | $G_{\text{máximo}}$ (dB) | $J_{\text{máxima}}$ (A/m) |
|----------------|-------------|----------|--------|---------------|--------------------------|---------------------------|
|                |             | (MHz)    | (%)    |               |                          |                           |
| Padrão         | 2,4533      | 203,8000 | 8,3167 | -16,7357      | 2,1750                   | 23,9400                   |
| Inset_Feed_1mm | 2,4733      | 167,4000 | 6,7615 | -20,3034      | 2,0677                   | 20,0030                   |
| Inset_Feed_4mm | 2,5000      | 98,6000  | 3,9434 | -12,2752      | 1,8124                   | 30,5120                   |

Fonte: Autoria própria.

Através das simulações é possível perceber que a inserção de fendas no *patch* ocasionou deslocamento na frequência de ressonância e diminuição da largura de banda. Contudo, para a antena Inset\_Feed\_1mm, apresentou uma melhora na perda de retorno para a frequência de ressonância de 2,4733 GHz, implicando em um ganho e diretividade maiores nessa frequência, que se encontra dentro da faixa para o padrão 802.11b do IEEE (2,4000 GHz – 2,4835 GHz).

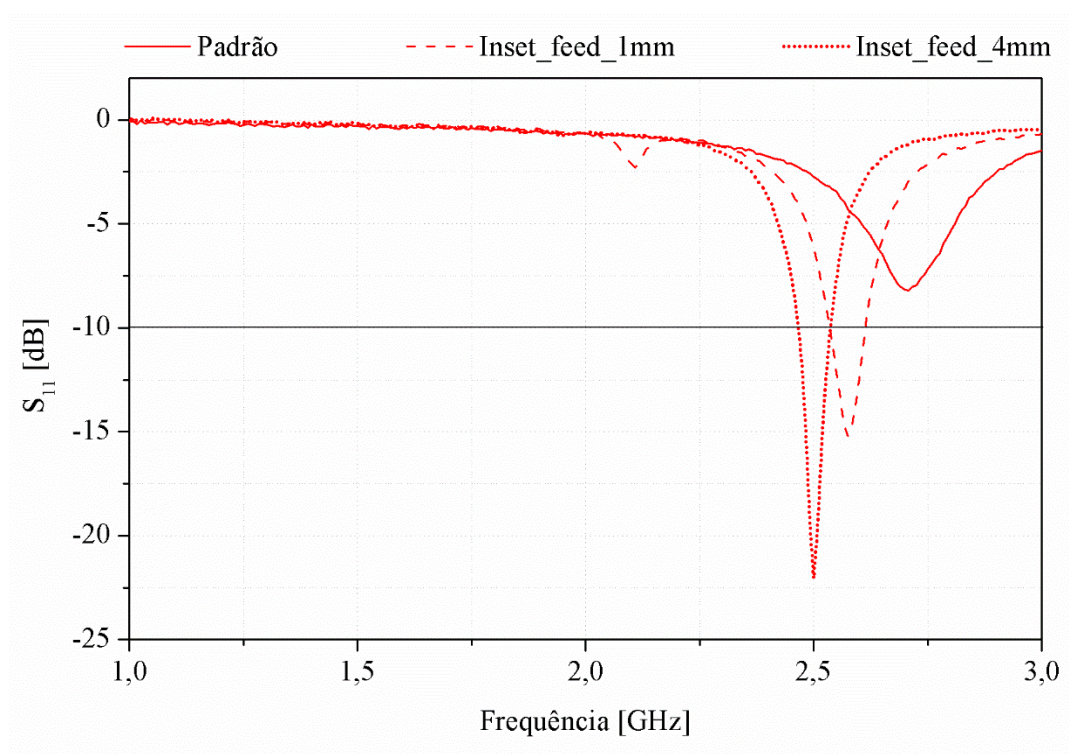
Um resumo dos dados simulados pode ser visto de forma completa nas Tabelas 16 e 17 presentes nos Apêndices B e C, respectivamente.

#### 4.4 ANÁLISE DAS ANTENAS TÊXTEIS

Com base nas análises dos dados apresentados, entre todos os tecidos, o PP+PLA foi o que obteve melhores resultados, pois possuiu uma das menores tangentes de perda, ótima

estabilidade dimensional (critério essencial para futuras aplicações), e sua antena ressoou na frequência de projeto requerida. Nesse contexto, os protótipos fabricados para teste utilizaram do tecido supracitado como substrato. A construção das três antenas simuladas (Padrão, Inset\_Feed\_1mm e Inset\_Feed\_4mm) foi realizada, e os diagramas de coeficiente de reflexão e carta de Smith obtidos durante os testes encontram-se dispostos nas Figura 87 e 88.

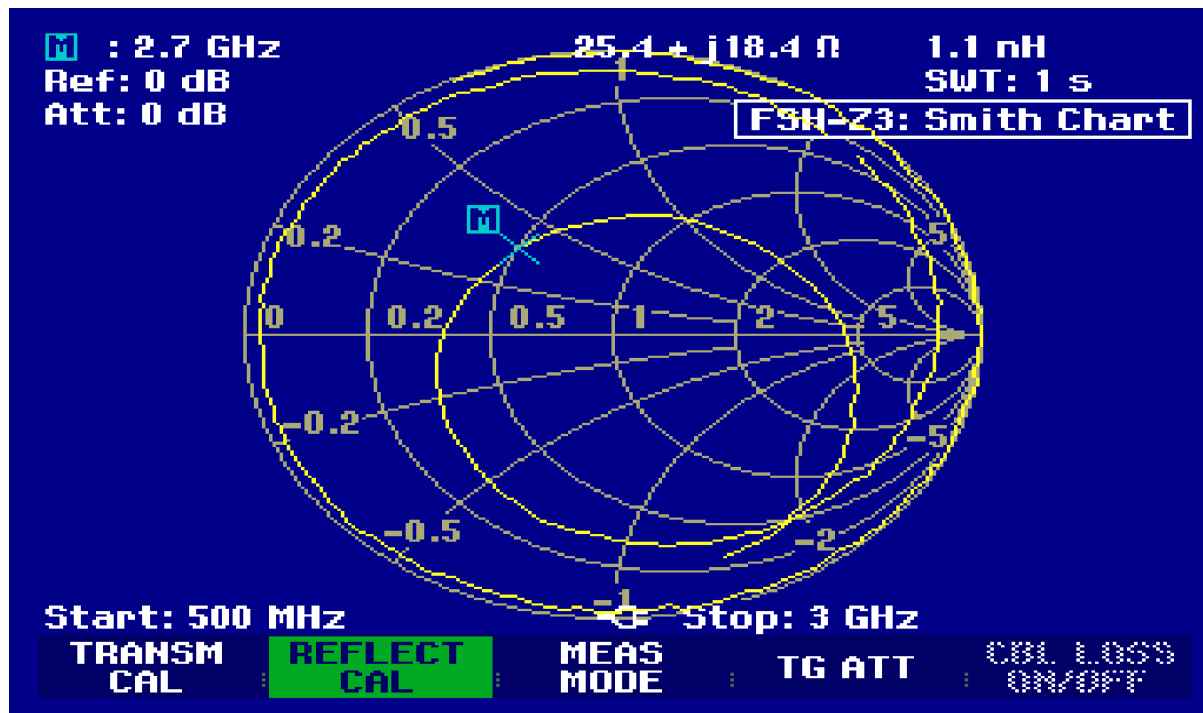
Figura 87 – Coeficientes de reflexão medidos para antenas com substrato de PP+PLA.



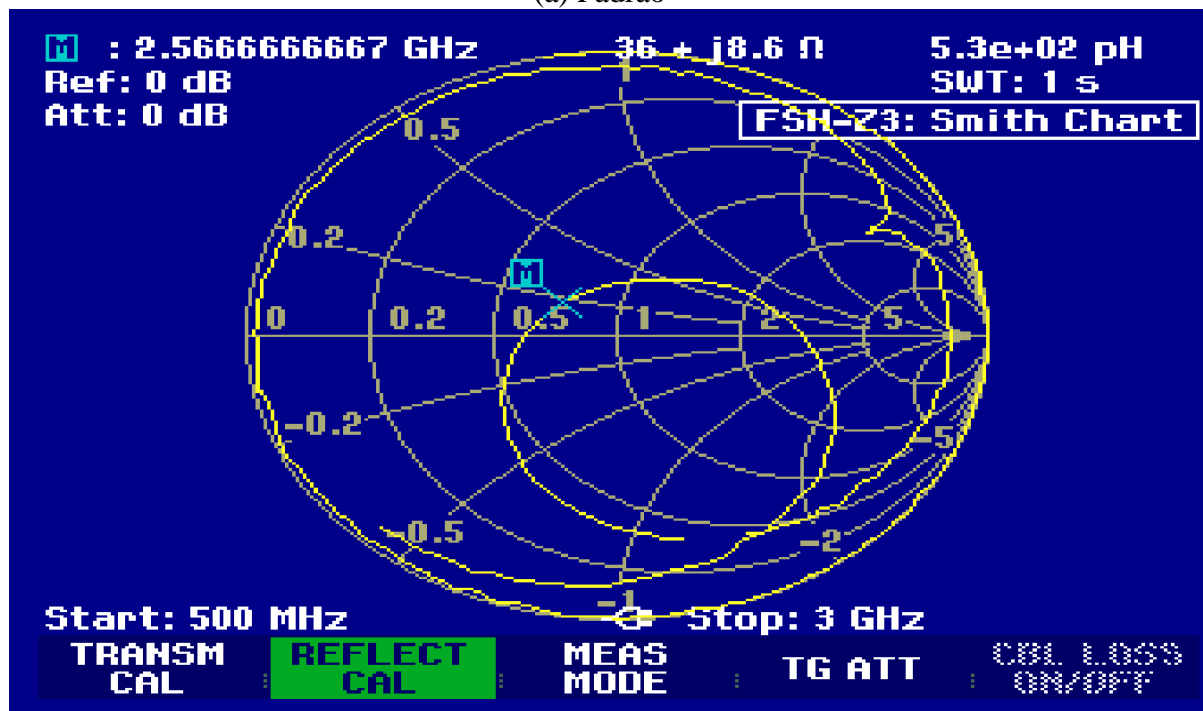
Fonte: Autoria própria.

A antena Padrão não ressoou abaixo de -10 dB na faixa de frequência de projeto e teve indicação do primeiro modo na frequência em 2,7083 GHz (-8,1988 dB), onde apresentou reatância indutiva de  $18,4 \Omega$  (ver Figura 81.a) e resistência cerca de 50% abaixo da impedância característica ( $50 \Omega$ ), mostrando a necessidade da implementação de técnicas de casamento de impedância. Por essa razão, as antenas com *inset feed* foram construídas e testadas. A inserção das fendas ocasionou a aproximação do valor de impedância de entrada com o da impedância característica, como ilustra a Figura 81.b e 81.c, fazendo com que as antenas Inset\_feed\_1mm e Inset\_feed\_4mm, atingissem, respectivamente, frequências de ressonância em 2,5750 GHz (-15,1995 dB) e 2,5000 GHz (-22,0390 dB), mantendo a banda larga (> 2%), propriedade esperada para esse tipo de antena.

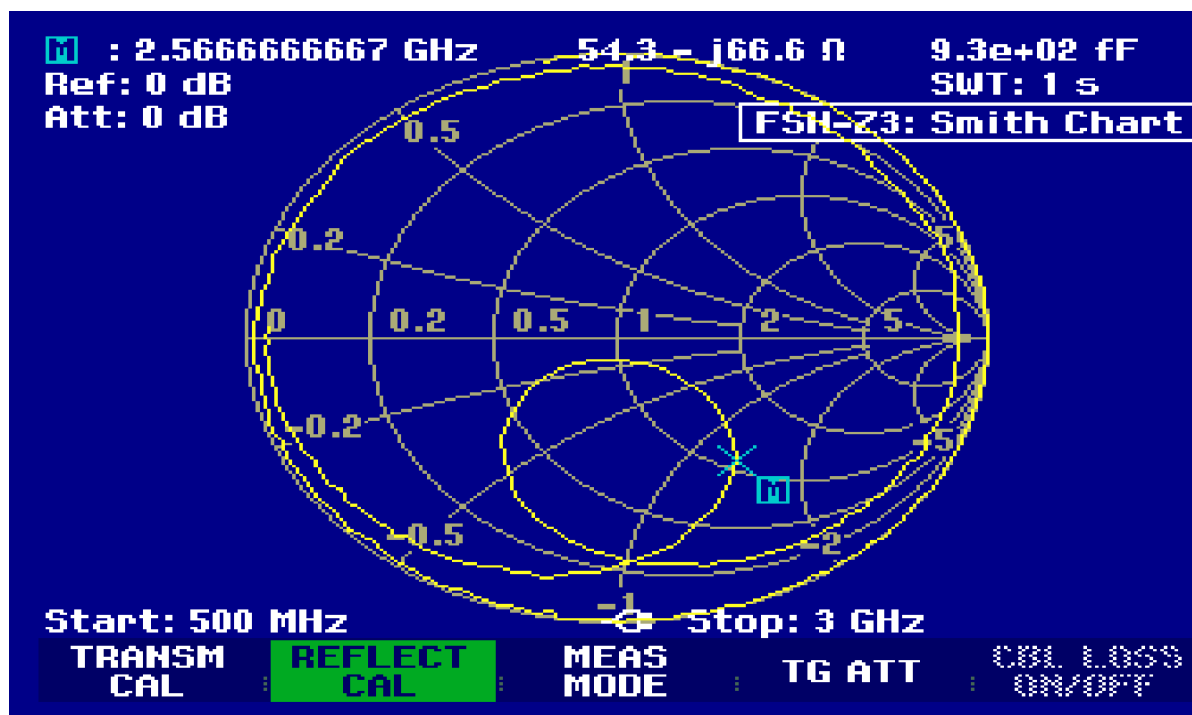
Figura 88 - Carta de Smith medida para antenas com substrato de PP+PLA.



(a) Padrão



(b) Inset\_feed\_1mm

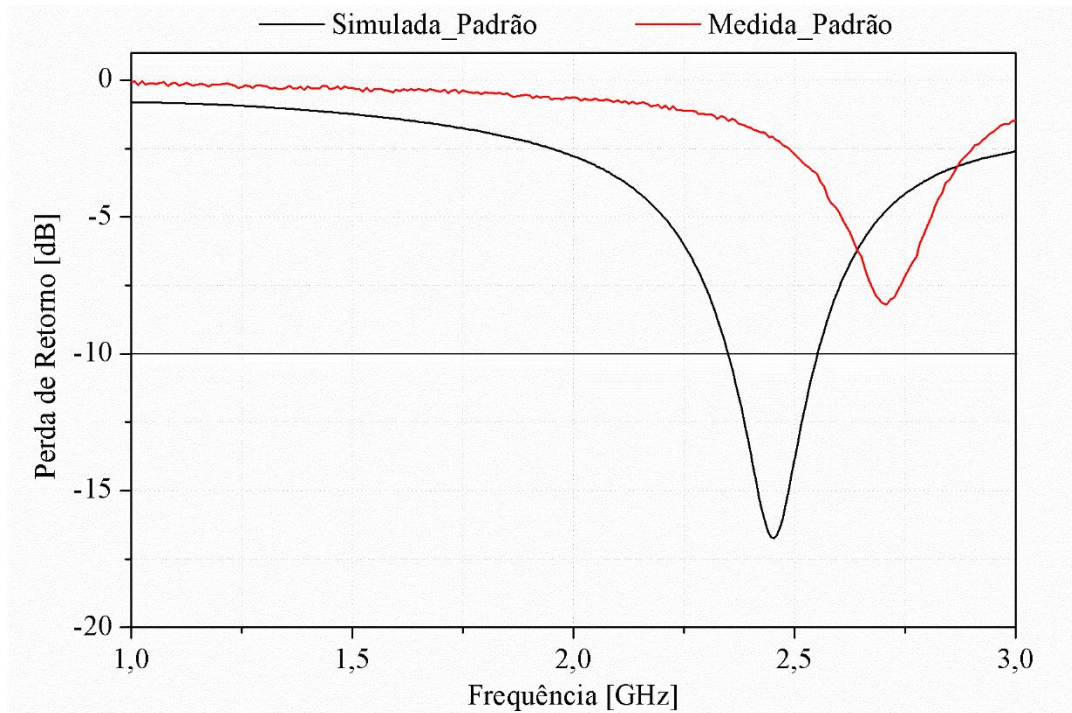


(c) Inset\_feed\_4mm

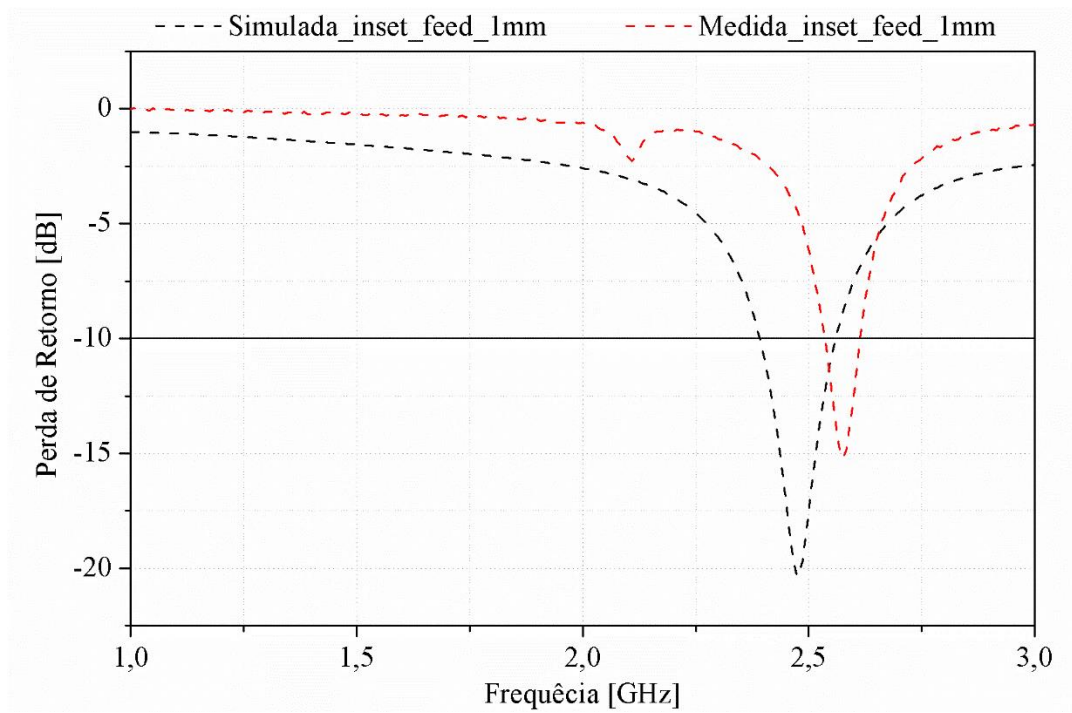
Fonte: Autoria própria.

Com base nas cartas de Smith geradas pelo analisador de espectro para as antenas com substrato PP+PLA é possível observar que a antena Inset\_feed\_4mm possui um valor de  $54,3 - j66,6 \Omega$  ( $2,5667 \text{ GHz}$ ) para impedância de entrada, o que implica em um fator de reflexão muito baixo, então a potência de entrada refletida possui valor muito baixo, permitindo que a maior parte da energia entregue à antena seja utilizada pelo *patch*, proporcionando um menor coeficiente de reflexão quando em comparação com as antenas Padrão ( $25,4 + j18,4 \Omega$  em  $2,7000 \text{ GHz}$ ) e Inset\_feed\_1mm ( $36 + j8,6$  em  $2,5667 \text{ GHz}$ ). Nota-se que ao adicionar a fenda de  $1 \text{ mm}$ , houve um aumento na resistência e diminuição da reatância indutiva apresentadas pela antena Padrão, considerando as frequências de ressonância específicas de cada antena, consequência da geração do efeito capacitivo provocado pelo *inset feed*. Quando a largura da fenda foi de  $4 \text{ mm}$ , o valor da parte real de  $Z_{in}$  foi muito próximo da impedância característica, contudo, apresentou uma reatância capacitiva superior a resistência, o que implica em perdas por energia reativa e efeito joule devido à presença concentrada de campos elétricos nas proximidades da fenda. A Figura 92, ilustra as comparações entre os coeficientes de reflexão das antenas medidas e simuladas.

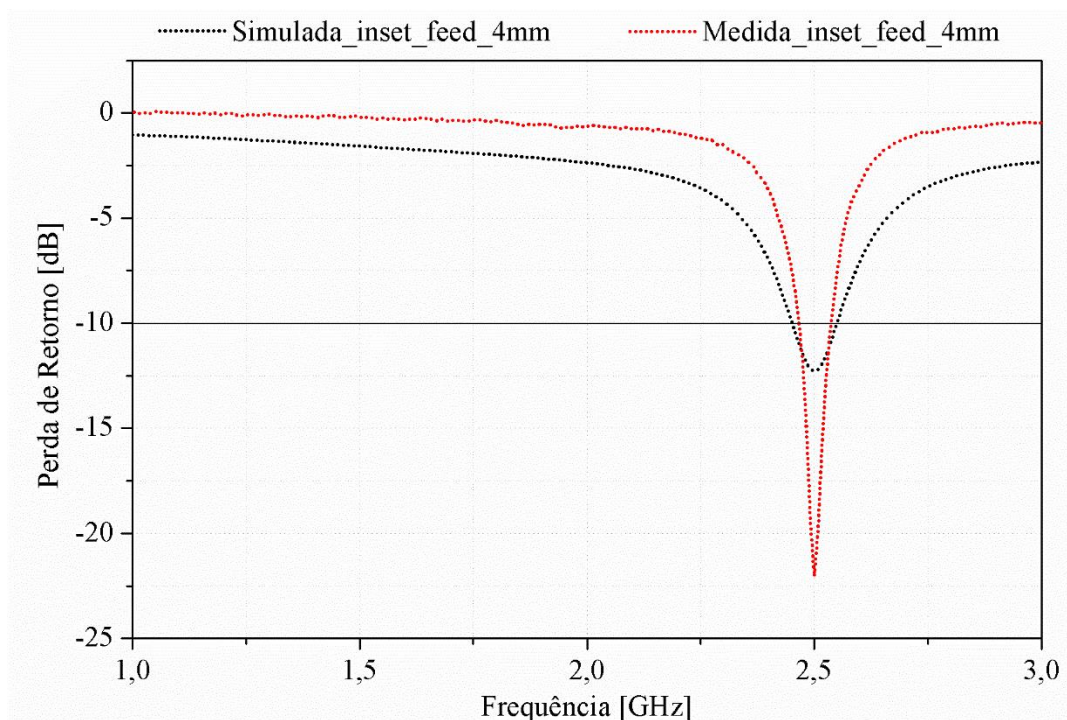
Figura 89 - Comparação entre os coeficientes de reflexão medidos e simulados para as antenas com substrato PP+PLA: (a) Padrão, (b) Inset\_feed\_1mm e (c) Inset\_feed\_4mm.



(a) Padrão



(b) Inset\_feed\_1mm



(c) Inset\_feed\_1mm

**Fonte:** Autoria própria.

A única antena que manteve a sua frequência de ressonância inalterada foi a *Inset\_feed\_4mm*, na qual a antena medida apresentou uma variação de +79,54% no coeficiente de reflexão e -3,74% na largura de banda em relação a simulada. A diminuição da largura de banda pode ser atribuída a formação de um filtro de frequência originado pela presença do efeito capacitivo gerado pela inserção das fendas no *patch*, que varia de acordo com as dimensões do *inset feed* e permissividade do dielétrico. As características de operação simuladas e medidas para as antenas com substrato PP+PLA encontram-se dispostas na Tabela 14.

Tabela 14 - Propriedades elétricas simuladas e medidas das antenas com substrato de PP+PLA

| Antena               |               | Padrão   | Inset_Feed_1mm | Inset_Feed_4mm |         |
|----------------------|---------------|----------|----------------|----------------|---------|
| Parâmetros Simulados | $f_r$ (GHz)   | 2,4533   | 2,4733         | 2,5000         |         |
|                      | BW            | (MHz)    | 203,8000       | 167,4000       | 98,6000 |
|                      |               | (%)      | 8,3072         | 6,7683         | 3,9440  |
|                      | $S_{11}$ (dB) | -16,7357 | -20,3034       | -12,2752       |         |



| Antena                |                   | Padrão          | Inset_Feed_1mm  | Inset_Feed_4mm   |
|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------------|------------------|
|                       | $Z_{in} (\Omega)$ | $37,94 + 3,23j$ | $48,94 - 9,61j$ | $39,21 - 19,34j$ |
| Parâmetros<br>Medidos | $f_r$ (GHz)       | -               | 2,5750          | 2,5000           |
|                       | BW                | (MHz)           | -               | 78,0000          |
|                       |                   | (%)             | -               | 3,0291           |
|                       | $S_{11}$ (dB)     | -               | -15,1995        | -22,0390         |
|                       | $Z_{in} (\Omega)$ | $25,4 + 18,4j$  | $36 + 8,6j$     | $54,3 - 66,6j$   |

Fonte: Autoria própria.

A discrepância entre os valores medidos e simulados são atribuídas a diversos fatores, tais como: falta de exatidão nas dimensões dos elementos constituintes da antena construída devido a técnica de fabricação manual, podendo haver uma variação de até 1 mm; limitações no desenho das estruturas têxteis e na simulação impostas pelo *software* (que considera o material como sendo um único bloco sólido com permissividade constante); alteração das características elétricas do substrato devido a infiltração da cola a base de cianoacrilato no tecido de malha no momento da fixação das partes condutoras ao substrato; existência de camadas de permissividade unitária (ar) adicionais entre as camadas do substrato, assim como entre o substrato e as partes condutoras, decorrentes da natureza flexível e instável dos tecidos; e incompatibilidade das características elétricas dos tecidos (constante dielétrica e tangente de perdas) medidas com as reais, devido ao método de caracterização utilizado, onde as amostras eram levemente pressionadas para que não houvessem *gaps* de ar entre as camadas de tecido.

## 5 CONCLUSÕES

Na etapa de caracterização dos tecidos de malha foi possível obter os parâmetros essenciais para o desenvolvimento da fase de projeto e simulação, que, por sua vez, permitiu a correlação dos parâmetros de operação da antena dimensionada com as propriedades elétricas e têxteis de cada amostra. Assim, diante desses resultados teóricos foi possível escolher o melhor material têxtil para compor o substrato de uma antena de microfita, construindo o protótipo e testando-o posteriormente.

O método da sonda coaxial para caracterização de tecidos foi essencial para obtenção dos parâmetros elétricos que são utilizados no projeto da antena, contudo, devido à alta taxa de porosidade do material, além de necessidade de compressão da amostra imposta pelo procedimento para aferição da permissividade, é necessário que haja um estudo posterior acerca de possíveis discordâncias entre os valores obtidos nesta etapa e os valores em condições de operação reais.

A caracterização e estudo teórico das propriedades têxteis foi importante para entender melhor como esses parâmetros (título, gramatura, espessura do tecido, etc.) influenciam na constante dielétrica e tangente de perdas do material, assim como na aplicabilidade desse tipo de antena. O estudo desses parâmetros para os tecidos analisados neste trabalho é complexo e de difícil correlação entre si pois todos possuíram propriedades distintas.

A adição de fibras sintéticas na composição do tecido de malha com estrutura Jersey implica num desempenho elétrico e físico diferente, que varia de acordo com material complementar (PLA, BAM ou SPF). O tecido de malha que apresentou melhores resultados para aplicação em antenas foi o composto por fibras de polipropileno e ácido polilático de milho (PP+PLA), devido a sua baixa tangente de perdas e alta estabilidade dimensional, característica predominante em todos os tecidos compostos por polipropileno.

Os métodos da cavidade e linha de transmissão mostraram-se eficazes para o dimensionamento das antenas têxteis com *patch* de formato retangular operando na faixa de frequência ISM. O HFSS<sup>®</sup> proporcionou o desenho e simulação das antenas projetadas, sendo os resultados obtidos fundamentais para escolha do tecido e posterior comparação com os valores reais. Embora esse *software* tenha apresentado algumas limitações, no geral, seus resultados foram próximos dos medidos, com exceção apenas para a antena Padrão.

A confecção das antenas foi feita de modo artesanal (manual), com baixa precisão, onde estima-se ser esta etapa umas das principais responsáveis pela discrepância entre os valores

simulados e medidos. Havendo a necessidade de estudo e implementação de outras técnicas de confecção e escolha de material condutor para compor a antena têxtil.

A técnica de casamento de impedância através da inserção de *inset feed* no *patch* mostrou-se eficaz para a antena têxtil construída, melhorando a impedância de entrada da antena e, conseqüentemente o coeficiente de reflexão. Contudo, ainda se faz necessário aplicação de outros métodos de ajuste fino para o deslocamento da frequência até a de operação desejada. Os dispositivos construídos com a inserção do *inset feed* ressoaram abaixo de -10 dB e possuíram banda larga, sendo a frequência central no primeiro modo deslocada em relação a projetada em decorrência aos aspectos físicos do tecido utilizado como substrato, bem como ao casamento de impedância que difere ao simulado.

Assim, ao final deste trabalho, pode-se concluir que é possível fabricar uma antena de microfita com substrato composto por tecido de malha a base de fibras sintéticas para operar na faixa de frequência ISM.

## 6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no projeto desenvolvido algumas recomendações se fazem necessárias para trabalhos futuros, dentre elas destaca-se:

- Variar apenas um parâmetro têxtil (título, estrutura, composição, etc.) por vez e observar qual a sua influência nas características do substrato e das antenas;
- Aprimorar ou utilizar outras técnicas de fabricação para obter maior precisão na etapa de implementação do projeto;
- Utilizar outros métodos de caracterização das propriedades elétricas dos tecidos e analisar qual seria o mais adequado para esse tipo de material;
- Investigar os parâmetros avaliados neste trabalho para tecidos utilizados comercialmente em vestimentas das áreas médica, militar e industrial.
- Avaliar a influência de outros tipos de material (e técnicas de aplicação) para compor as partes condutoras das antenas.
- Observar o efeito das curvaturas, lavagem, tensões e/ou compressões externas as quais as antenas podem estar sujeitas, nas características de funcionamento das antenas têxteis com substrato de malha;
- Integrar e testar as antenas em vestimentas comerciais, submetendo-as a condições controladas (em ambiente interno, variando um parâmetro por vez) e não-controladas (aplicando em ambientes externos, sob condições de uso real);
- Estudar a aplicação de material têxtil para o desenvolvimento de outros dispositivos de micro-ondas.
- Pesquisar e testar técnicas de tratamento e fabricação de tecidos que aumentem a estabilidade e proporcione melhores condições de fabricação das antenas.

## REFERÊNCIAS

- 3776, ASTM. **Standard Test Method For Mass Per Unit Area (Weight) Of Fabric**, 2002.
- 3887, ASTM. **Standard Specification For Tolerances For Knitted Fabrics**, 2008.
- 5034, ASTM. **Standard Test Method For Breaking Strength And Elongation Of Textile Fabrics (Grab Test)**, 2013.
- 6207, ASTM. **Test Method For Dimensional Stability Of Fabrics To Changes In Humidity And Temperature**, 2015.
- ALIGENT TECHNOLOGIES. **Agilent 85070E Dielectric Probe Kit 200 MHz to 50 GHz**. Technical Overview; Agilent Technologies: Santa Clara, CA, USA, 2008.
- ANDERSON, R. W. **S-Parameter Techniques for Faster, More Accurate Network Design**. Hewlett-Packard Journal. p. 13-24, 1967.
- AQUINO, B. L. A. **Antenas de Microfita com Substrato Metamaterial**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação Engenharia Elétrica da UFRN. Natal, 2008.
- ARAÚJO, G. L. R. **Efeito da Inclinação do Plano de Terra para Antenas de Microfita Multicamadas com Elementos Parasitas Fractais**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFRN. Natal, 2011.
- ARAÚJO, M.; et al., **Têxteis Técnicos: Materiais do novo milénio**. vol. 1, 2 e 3. Braga: Ed. Williams, Lda, Ministério da economia, 2001.
- ASSAD, F. T.; NETO, J. B. S. S.; MORAES, K. K. et al. **Processamento do Algodão para a Produção Têxtil**. IV Encontro de Produção Agroindustrial. Paraná, 2010.
- Associação Brasileira de Telecomunicações (TELEBRASIL). **O Desempenho do Setor de Telecomunicações no Brasil Séries Temporais 1S16**. (2016). Disponível em: <<http://www.telebrasil.org.br/panorama-do-setor/desempenho-do-setor>>. Acesso em 02 de dez. de 2016.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 12744: Fibras têxteis – Classificação**. Rio de Janeiro, 1992.
- BAHL, I. J.; BHARTIA, P. **Microstrip Antenna Technology**. IEEE Trans. Antennas Propagation., vol. ap-29, nº 1, p. 2-24, 1981.
- BALANIS, C. A. **Advanced Engineering Electromagnetics**. New York: John Wiley & Sons, 1989.
- BALANIS, C. A. **Teoria das antenas: análise e síntese**. vol. 1 e 2. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

BARROS, V. E. **Estudo do Efeito de Substrato Metamaterias em Parâmetros de Antenas de Microfita**. Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN. Natal, 2012.

BATALHA, M. O.; BUAINAIN, A. M. **Cadeia produtiva do algodão**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Série Agronegócios, Brasília, v. 4, 2007.

BERNAL, J. I. M. **Dispositivos de Microondas Utilizando Filmes de Alta Constante Dielétrica**. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2010.

BOYES, S. J.; SOH, P. J.; HUANG, Y.; et al. **On-body performance of dual-band textile antennas**. IET Microwaves, Antennas & Propagation, Vol. 6, Iss. 15, p. 1696–1703, 2012.

BRINHOLE, E. R. **Determinação da frequência de ressonância de antenas tipo microfita triangular e retangular utilizando redes neurais artificiais**. 2005. 87 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru, 2005. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/90435>>.

BULLA, G. **Otimização da Largura de Banda de Antena de Microfita**. Tese (doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

CAETANO, L. M. **Materiais Supercondutores HTS para Arranjos de Antenas e Aplicação de PBG para Micro-ondas**. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN. Natal, 2014.

CALLISTER, W.D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 832 p. ISBN: 978-0-471-73696-7.

CARNEIRO FILHO, R. **Desenvolvimento de substrato cerâmico BiNbO4 para antenas de microfita de sistemas de comunicações sem fio**. Natal, 2010, 82 p. Tese (Doutorado em Ciências). Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

CAVALCANTE, G. A. **Desenvolvimento de Circuitos Planares sobre Substratos Têxteis**. 2014. 115 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFRN. Natal, 2014.

CHAN, K-C., HARTE, Alphonse. **Impedance matching and the Smith chart – The fundamentals**. RF antennas tx/rx. p. 52-66. jul. 2000.

CHEN, L.F. et al. **Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization**. West Sussex (England): John Wiley & Sons, Ltd, 2004. 537 p. ISBN: 0-470-84492-2.

DAVIDSON, D. B. **Computational Electromagnetics for RF and Microwave Engineering**. United States of America: Cambridge University Press. p. 433. 2005.

DECLERCQ, F.; ROGIER, H. **Characterization of electromagnetic properties of textile materials for the use in wearable antennas**. In: 2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. IEEE, 2009. p. 1-4.

DUARTE, A. **Sensores Passivos em Suporte de Papel**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica e Telecomunicações. Universidade de Aveiro, 2013.

ELIAS, N. A.; SAMSURI, N. A.; RAHIM, M. K. A.; et al. **Effects of Human Body and Antenna Orientation on Dipole Textile Antenna Performance and SAR**. IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics, p.132-136, 2012.

FANGUEIRO, R. **Optimização do Desenvolvimento de Preformas em Malha de Trama para Materiais Compósitos**. Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia Têxtil, Universidade do Minho, Guimarães, 2002.

FAN, S.; VILLENEUVE, P. R.; JOANNOPOULOS, J. D. **Channel drop tunneling through localized states**, Phys. Rev. Letters, vol. 80, no. 5, pp. 960-963, 1998.

FILHO, V. A. A. **Arranjo de Log-Periódicos Compactos em Microfita com Elementos Fractais de Koch**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRN. Natal, 2010.

GHAVAMI, M. et al. **Ultra Wideband: Signals and Systems in Communication Engineering**. West Sussex: John Wiley & Sons. p. 278. 2004.

GOMES PEREIRA, F. S. **Polímeros: Fundamentos Científicos E Tecnológicos**. Instituto Federal de Pernambuco. Recife, 2009.

GONÇALVES, F. J. F. **Medição das Propriedades Constitutivas Eletromagnéticas de Materiais da Faixa de 1 a 6 GHz pelo Método do Espaço Livre**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFMG. Belo Horizonte, 2012.

GRILO, M.; CORRERA, F. S. **Parametric study of rectangular patch antenna using denim textile material**. In: Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 2013 SBMO/IEEE MTT-S International. IEEE, 2013. p. 1-5.

GRIPA, D. **Qual a Viabilidade da Aplicação da Viscose Feita de Bambu em Artigos de Vestuário**. 2009.

GUERRA, J. R. F. **PROJETO DE ANTENA DE MICROFITA FLEXÍVEL UTILIZANDO DE TECIDO MALHA A BASE DE FIBRAS NATURAIS E SINTÉTICAS**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da UFERSA. Mossoró, 2016.

GUPTA, B.; SANKARALINGAM, S.; DHAR, S. **Development of wearable and implantable antennas in the last decade: A review**. IEEE Conference Publications, pp. 251–267, 2010.

HAAGENSON, Tessa et al. **Textile Antennas for Spacesuit Applications: Design, simulation, manufacturing, and testing of textile patch antennas for spacesuit applications**. IEEE Antennas and Propagation Magazine, v. 57, n. 4, p. 64-73, 2015.

HAMMERSTAD, E. O. **Equations for a Microstrip Circuit Design**. Proc. Fifth European Microwave Conf., p. 268-272, Setembro 1975.

HERTLEER, C.; LAERE, A. V.; ROGIER, H.; et al. **Influence of Relative Humidity on Textile Antenna Performance**. Textile Research Journal. vol.80, p. 177 – 183, 2010.

HERTLEER, C.; TRONQUO, A.; ROGIER, H.; et al. **The Use of Textile Materials to Design Wearable Microstrip Patch Antennas**. Textile Research Journal. vol. 78, p. 651 – 658, 2008.

HESTAND, R.; CHRISTODOULOU, C. **Analysis of Planar Microstrip Antennas Using the Finite Element Method**. IEEE, p.136-139, 1996.

HOLLAND, S. A. et al. **Ultra wideband textile antenna development for indoor localization**. In: Microwave Symposium Digest (IMS), 2013 IEEE MTT-S International. IEEE, 2013. p. 1-4.

HUANG, Yi, BOYLE, Kevin. **Antennas: From Theory to Practice**. Singapore: John Wiley & Sons. p 379. 2008.

IGLESIAS, R.E.; GALLEGO, I. G.; SANCHEZ, L. I.; et al. **Textile Soft Surface for Back Radiation Reduction in Bent Wearable Antennas**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, p. 3873-3878, 2013.

International Textil Manufacturers Federation (ITMF). **Pressrelease**. (2015). Disponível em:<<http://www.itmf.org/wb/pages/home/publications/pressrelease.php?id=1>>. Acesso em 05 de dez. de 2015.

IVAN DE MEDEIROS, J. **Estudo do Comportamento de Estruturas Fibrosas com Base em Materiais com Memória de Forma e Elastómeros**. Tese (Doutorado). Curso de Engenharia Têxtil, Universidade do Minho, Guimarães, 2013.

JAMES, R. **Handbook of Microstrip Antennas**. United States of America: IET. 1989.

KASSEM, H.; LUNET, G.; VIGNERAS, V. **Characterization techniques for materials' properties measurement**. INTECH Open Access Publisher, 2010.

KISHK, A. **Advancement in Microstrip Antennas with Recent Applications**. Intech, 2013.

KIOURT, A.; VOLAKIS, J. L. **Wearable Antennas Using Electronic Textiles for RF Communications and Medical Monitoring**. In: 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE, 2016. p. 1-2.

KIOURTI, A.; LEE, C.; VOLAKIS, J. L. **Fabrication of textile antennas and circuits with 0.1 mm precision**. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, v. 15, p. 151-153, 2016.

KOSKI, K. et al. **Fundamental characteristics of electro-textiles in wearable UHF RFID patch antennas for body-centric sensing systems**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, v. 62, n. 12, p. 6454-6462, 2014.

KOSKI K.; MORADI, E.; VENA, A. et al. **Characterization of electro-textiles using wireless reflectometry for optimization of wearable UHF RFID tags**. In Proc. PIERS Symp., 2013, p. 5.



KRETLY, L.C. et al. **Dielectric Permittivity and Loss of CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> (CCTO) Substrates for Microwave Devices and Antennas.** Journal of Materials Science: Materials in Electronics, vol. 15, n. 10, p. 657–663, 2004.

KUASNE, A. **Apostila de Fibras Têxteis.** Módulo II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina: Araranguá, 2008.

LEGG, A. P. Capítulo III: Parâmetros principais de uma antena. 14 p. Notas de Aula. Grupo de Pesquisa em Processamento de Sinais e Comunicações, UFSM. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/gpscom/professores/andrei/Semfio/cap6tulo%203.pdf>>. Acesso em 10 jun. de 2016.

LEŚNIKOWSKI, J. **Dielectric permittivity measurement methods of textile substrate of textile transmission lines.** Przegląd Elektrotechniczny, v. 88, n. 3a, p. 148-151, 2012.

LILJA, J. SALONEN, P.; KAIJA, T.; et al. **Design and Manufacturing of Robust Textile Antennas for Harsh Environments.** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, p.4130-4140, 2012.

LIMA FILHO, N. O. **Design de Estruturas de Malhas Multifuncionais:Optimização da Transferência de Líquidos.** 2009. 328 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Têxtil, Universidade do Minho, Guimarães, 2009.

LIM, E. G.; WANG, Z.; WANG, J. C.; et al. **Wearable Textile Substrate Patch Antennas.** Engineering Letters. vol. 22, p. 2 – 8, 2014.

LIN, C.; ITO, K. **A Compact Dual-Mode Wearable Antenna for Body-Centric Wireless Communications.** Electronics. vol. 3, p. 398 – 408, 2014.

LOSS, C. **Novos Horizontes em Design de Moda: Desenvolvimento de Antena para Vestuário.** 2012. 84 f. Dissertação (Mestrado) –Curso de Design de Moda, Universidade da Beira Interior. Covilhã, 2012.

LOCHER, I.; TRÖSTER, G. **Screen-printed textile transmission lines.**Textile Research Journal, v. 77, n. 11, p. 837-842, 2007.

MACEDO, A. M. K. S. **Apostila de Análise de Malhas.** 1<sup>a</sup> ed. Disponível em:<[https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/2/26/Apostila\\_de\\_analise.pdf](https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/2/26/Apostila_de_analise.pdf)>. Acesso em abr. de 2016.

MARTINS, R. P. **Moda comprometida com a responsabilidade ecológica e social: várias abordagens.** Tese de Doutorado. Universidade da Beira Interior. 2009.

MATIN, M A, SAYEED, A. I., **A Design Rule for Inset-fed Rectangular Microstrip Patch Antenna.** WSEAS Transactions on Communications, Vol 9, N. 1, p. 63-72, Jan. 2010.

MEDEIROS, T. E. L. **Antenas de Microfita sobre substrato dielétrico organizado de forma quase periódica.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da UFERSA. Mossoró, 2013.

- MOLITON, A. **Basic Electromagnetism and Materials**. New York: Springer, 2007. 430p.
- MORETTI, A. et al. **Characterization and validation of a textile substrate for RF applications**. In: 2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011). 2011.
- MUNSON, R. E. **Conformal Microstrip Antena and Micostrip Phased Arrays**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. v. AP-22, n. I, p. 74-78, Jan. 1974.
- PAIVA, A. **Engenharia têxtil – Fibras Artificiais**. São Paulo: Março, 2010.
- PINTEREST. **Shape memory textiles that when opened will automatically re-fold into their packed state**. Disponível em: < <https://br.pinterest.com/pin/432627107931701542/>>. Acesso em 19 de Jun. de 2016.
- POZAR, David M. **Microwave Engineering**. 4 ed. United States of America: John Wiley & Sons. p. 756. 2012.
- PRADELLA, J. G. C. **Bipolímeros e intermediários químicos**. Relatório Técnico, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), São Paulo, 2006.
- RAMESH, M., YIP, K. B. **Design Inset-Feed Microstrip Patch Antennas**. 2003. Disponível em: <<http://mwrf.com/components/design-inset-fed-microstrip-patch-antennas>>. Acesso em 28 de Jun. 2016.
- SADIKU, M. N. O. **Elementos de eletromagnetismo**. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- SALVADO, R.; LOSS, C.; GONÇALVES, R. et al. **Textile Materials for the Design of Wearable Antennas: A Survey**. Sensors Journal. 2012, 12, p.15841-15857.
- SAVADO, R.; LOSS, C.; PINHO, P. **Poluição electromagnética e os novos desafios em moda: integração de antenas em vestuário**. Conferência Internacional de Moda, 2012.
- SANKARALINGAM, S.; GUPTA, B. **Development of textile antennas for body wearable applications and investigations on their performance under bent conditions**. Progress In Electromagnetics Research B, v. 22, p. 53-71, 2010.
- SCOTWEAVE. **Technical Weaver**. Disponível em: <[http://scotweave.com/media/resources/technical\\_weaver.pdf](http://scotweave.com/media/resources/technical_weaver.pdf)>. Acesso em 18 de Jun. de 2016.
- SILVA, I. B. T. **Projeto e Análise de Antena de Microfita com Utilização de Metamaterial do Tipo CSRR**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da UFERSA. Mossoró, 2014.
- SILVA, M. R. **Novas Configurações de Monopolos Planares Quase-Fractais para Sistemas de Comunicação Móveis**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRN. Natal, 2008.

SOARES, M. D. **Tutoriais Banda Larga: WLAN X Sistemas Móveis Celulares.** (2004). Disponível em: <[http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwlanx/pagina\\_3.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwlanx/pagina_3.asp)>. Acesso em out. de 2015.

SOUZA, D. **Uso do Pentóxido de Nióbio para Aplicação como Substrato de Antenas de Microfita.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Programa de Pós Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação. Mossoró, 2015.

SOUZA PEREIRA, G. **Materiais e Processos Têxteis.** Instituto Federal de Educação em Ciência e Tecnologia de Santa Catarina: Araranguá, 2009.

\_\_\_\_\_. **Apostila de Introdução à Tecnologia Têxtil.** Módulo II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina: Araranguá, 2009.

SUBRAMANIAM, S., DHAR, S.; PATRA, K. et al. **Miniaturization of Wearable Electrotexile Antennas using Minkowski Fractal Geometry.** IEEE, p.309-310, 2014.

TSOLIS, A.; WHITTOW, W. G.; ALEXANDRIDIS, A. A.; et al. **Embroidery and Related Manufacturing Techniques for Wearable Antennas: Challenges and Opportunities.** Electronics. 2014; 3: 314 – 338.

VEBLEN, Sarah. **Know Your Knits.** Threads Magazine, n. 97, p. 59-63, 2008.

VIRKKI, J.; BJÖRNINEN, T.; MERILAMPI, S.; et al. **The Effects of Recurrent Stretching on the Performance of Electro-Textile and Screen-Printed Ultra-High-Frequency Radio-Frequency Identification Tags.** Textile Research Journal. vol. 85, p. 294 – 301, 2015.

WENTWORTH, S. M., **Fundamentos de Eletromagnetismo com Aplicações em Engenharia,** LTC, 2006.

YARMAN, B. S. **Design of Ultra Wideband Antenna Matching Networks.** Istanbul: Springer. p. 308. 2008.

YAO, L.; QIU, Y. **Design and electromagnetic properties of conformal single-patch microstrip antennas integrated into three-dimensional orthogonal woven fabrics.** Textile Research Journal, v. 85, n. 6, p. 561-567, 2015.

### APÊNDICE A: Resumo das características elétricas e têxteis

Tabela 15 - Resumo das características elétricas e têxteis dos tecidos analisados.

| Ensaio                   | Parâmetro                     |               | Tecido    |           |            |        |        |        |
|--------------------------|-------------------------------|---------------|-----------|-----------|------------|--------|--------|--------|
|                          |                               |               | CO_Jersey | CO_Piquet | SPF_Piquet | PP+SPF | PP+PLA | PP+BAM |
| Elétrico                 | Frequência 2.45 GHz           | $\epsilon'$   | 1,5453    | 1,4427    | 1,5387     | 1,9383 | 1,4060 | 1,7581 |
|                          |                               | $\epsilon''$  | 0,5616    | 0,2688    | 0,1459     | 0,4390 | 0,1341 | 0,3728 |
|                          |                               | $\tan \delta$ | 0,3634    | 0,1863    | 0,0948     | 0,2265 | 0,0954 | 0,2120 |
| Titulação e Gramatura    | Título (Tex)                  |               | 19,53     | 23,37     | 14,30      | 15,37  | 18,83  | 20,50  |
|                          | Gramatura (g/m <sup>2</sup> ) |               | 169,70    | 188,80    | 112,43     | 258,57 | 299,00 | 320,80 |
| Espessura                | Fio (mm)                      |               | 0,18      | 0,18      | 0,14       | 0,14   | 0,20   | 0,14   |
|                          | Tecido (mm)                   |               | 0,58      | 0,66      | 0,58       | 0,62   | 0,70   | 0,70   |
| Estabilidade Dimensional | Variação                      | Curso         | -10%      | -4%       | -25%       | 2%     | 0%     | 2%     |
|                          |                               | Coluna        | 0%        | -5%       | -22%       | 5%     | 0%     | 2%     |
| Resistência a Tração     | Força Máxima (N)              | Curso         | 291,2     | 248,7     | 152,6      | 444,95 | 465,7  | 532,9  |
|                          |                               | Coluna        | 475       | 167,7     | 79,32      | 418,52 | 423,4  | 433,2  |
|                          | Alongamento Máximo            | Curso         | 151,6%    | 126,4%    | 110,8%     | 153,2% | 140,8% | 148%   |
|                          |                               | Coluna        | 115,2%    | 122,8%    | 85,2%      | 137,6% | 130,4% | 153,2% |

**APÊNDICE B: Resumo das dimensões das antenas têxteis projetadas**

Tabela 16 - Resumo das dimensões físicas para as antenas têxteis projetadas

| Tecido     | <i>Patch</i>  |               | <b>Linha de transmissão</b> |                           | <b>Substrato</b>          |                           |               | <i>Inset Feed</i>         |                           |
|------------|---------------|---------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|---------------------------|---------------------------|
|            | <b>W (mm)</b> | <b>L (mm)</b> | <b>W<sub>0</sub> (mm)</b>   | <b>L<sub>0</sub> (mm)</b> | <b>L<sub>s</sub> (mm)</b> | <b>W<sub>s</sub> (mm)</b> | <b>h (mm)</b> | <b>y<sub>0</sub> (mm)</b> | <b>y<sub>w</sub> (mm)</b> |
| CO_Jersey  | 54,2338       | 47,8422       | 6,7062                      | 24,9416                   | 108,4676                  | 99,7662                   | 1,7400        | -                         | -                         |
| CO_Piquet  | 55,3611       | 49,2096       | 7,9422                      | 25,7943                   | 110,7222                  | 103,1772                  | 1,9800        | -                         | -                         |
| SPF_Piquet | 54,3043       | 47,9399       | 6,7215                      | 24,9920                   | 108,6085                  | 99,9679                   | 1,7400        | -                         | -                         |
| PP+SPF     | 52,0996       | 44,8893       | 6,6299                      | 23,4885                   | 104,1992                  | 93,9541                   | 1,8600        | -                         | -                         |
| PP+BAM     | 50,4768       | 42,6683       | 7,0572                      | 22,4770                   | 100,9535                  | 89,9080                   | 2,1000        | -                         | -                         |
| PP+PLA     | 55,7817       | 49,6965       | 8,5373                      | 26,1216                   | 111,5634                  | 104,4864                  | 2,1000        | -                         | -                         |
|            |               |               |                             |                           |                           |                           |               | 11,0000                   | 4,0000                    |
|            |               |               |                             |                           |                           |                           |               | 11,0000                   | 1,0000                    |

### APÊNDICE C: Resumo das características elétricas para as antenas simuladas

Tabela 17 - Resumo das características elétricas para as antenas têxteis simuladas.

| Tecido     |                | Frequência de Ressonância (GHz) | Coefficiente de Reflexão (dB) | Largura de Banda Fracionária (%) | BW (MHz) | Ganho máximo em 2,45GHz (dB) | Densidade máxima de Corrente (A/m) |
|------------|----------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------|------------------------------|------------------------------------|
| CO_Jersey  |                | -                               | -                             | -                                | -        | 3,4375                       | 22,4350                            |
| CO_Piquet  |                | 2,4667                          | -22,4846                      | 12,6182                          | 311,0000 | -0,6548                      | 17,1770                            |
| SPF_Piquet |                | 2,4333                          | -21,1609                      | 7,9938                           | 194,7000 | 1,3252                       | 37,0370                            |
| PP+SPF     |                | 2,5133                          | -25,1267                      | 10,8488                          | 272,7000 | -0,9418                      | 18,7860                            |
| PP+BAM     |                | 2,6067                          | -25,9822                      | 8,9699                           | 233,5000 | 0,6479                       | 21,3470                            |
| PP+PLA     | Padrão         | 2,4533                          | -16,7357                      | 8,3167                           | 203,8000 | 2,1750                       | 23,9400                            |
|            | Inset_feed_1mm | 2,4733                          | -20,3034                      | 6,7615                           | 167,4000 | 2,0677                       | 20,0030                            |
|            | Inset_feed_4mm | 2,5000                          | -12,2752                      | 3,9434                           | 98,6000  | 1,8124                       | 30,5120                            |